

DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id4963>

Avaliação das variáveis de funcionamento de um sistema de climatização dessecante a partir da inserção de um rotor entálpico em série com um rotor dessecante

Francisco José Araujo Melo ^[1], José Maurício Alves de Matos Gurgel ^[2] ,
Márcio Gomes da Silva ^[3], José Josimar Soares ^[4]

[1] fjameloufpb@gmail.com. [2] jm.gurgel@uol.com.br. Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil. [3] mgcefet@gmail.com. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Brasil. [4] josimar.soares@ifam.edu.br. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), Brasil.

RESUMO

No presente trabalho foi realizada uma investigação experimental em um sistema de climatização dessecante, com a intenção de conhecer os benefícios da inserção de um rotor entálpico em sua estrutura. Basicamente, foi realizada uma análise da energia térmica consumida para reativar o sólido adsorvente de um rotor dessecante e também a efetividade do processo de desumidificação inerente ao sistema. Para isso, foram montadas duas bancadas de testes: a primeira formada por apenas um rotor dessecante; a segunda por um rotor dessecante e um rotor entálpico. Os resultados alcançados serviram para orientar a concepção de um novo sistema de climatização híbrido, bem como para mostrar a importância da inserção dos rotores entálpicos nos sistemas de climatização dessecantes. A combinação do rotor entálpico com o rotor dessecante ofereceu maior vantagem ao sistema de climatização, tanto em relação à sua efetividade de desumidificação quanto à possibilidade de consumir menos energia no processo de reativação do sólido adsorvente do rotor dessecante. Foi observado, no estudo, que, na menor temperatura de reativação usada para avaliar a atuação conjunta dos rotores, os resultados da efetividade de desumidificação e do consumo de energia de reativação foram expressivamente melhores do que aqueles apresentados usando a maior temperatura de reativação quando da avaliação do rotor dessecante atuando de forma isolada.

Palavras-chave: desumidificação; energia térmica; rotor dessecante; rotor entálpico.

Appraisal of operating variables of a desiccant air conditioning system from the insertion of an enthalpic rotor in series with a desiccant rotor

ABSTRACT

In the present work an experimental investigation was carried out in a desiccant air conditioning system with the intention of knowing the benefits of the insertion of an enthalpy wheel in its structure. Basically, an analysis of the thermal energy consumed to reactivate the adsorbent solid of a desiccant wheel and also the effectiveness of the dehumidification process inherent to the system. For this, two test benches were mounted,

the first one was mounted a desiccant wheel, the second one was mounted the desiccant wheel and by an enthalpy wheel. The results achieved from this work served to guide the design of a new hybrid air conditioning system as well as to show the importance of enthalpic wheels for all desiccant air conditioning systems. The combination of the enthalpy wheel with the desiccant wheel, offered a greater advantage to the air conditioning system both in relation to its dehumidification effectiveness and the possibility of consuming less energy in the process of reactivating the adsorbent solid of the desiccant wheel. It was observed in the study that in the lowest reactivation temperature used to evaluate the joint performance of the wheels, the results of the dehumidification effectiveness and the reactivation energy consumption were significantly better than those presented using the highest reactivation temperature when evaluating the wheel desiccant acting in isolation.

Keywords: *dehumidification; desiccant wheel; enthalpy wheel; thermal energy.*

1 Introdução

A climatização mecânica é um processo voltado ao alcance das condições de conforto térmico necessárias ao ser humano. Para este, ventilação, pureza, renovação, temperatura e umidade do ar são fatores relevantes para o seu bom funcionamento psicomotor.

Para Amorim, Mello e Souza (2018), relativamente aos usuários de ambientes climatizados, a temperatura do ar altera a capacidade de concentração, podendo levá-los à redução de produtividade em situações de desconforto, tanto para o calor quanto para o frio. Ainda segundo os autores, a baixa umidade relativa do ar pode ocasionar o ressecamento dos olhos e mucosas, o que pode possibilitar o surgimento ou agravamento de problemas respiratórios.

Pelos meios convencionais de climatização, o alcance e a manutenção das condições ideais de climatização da massa de ar de ambientes fechados requerem a utilização de energia. Concordando com Ramos e Susteras (2006), a energia, em especial a elétrica, é um insumo básico sem o qual é impossível imaginar a prosperidade da economia. Por essa razão, logísticas devem ser pensadas para preservar as fontes não renováveis.

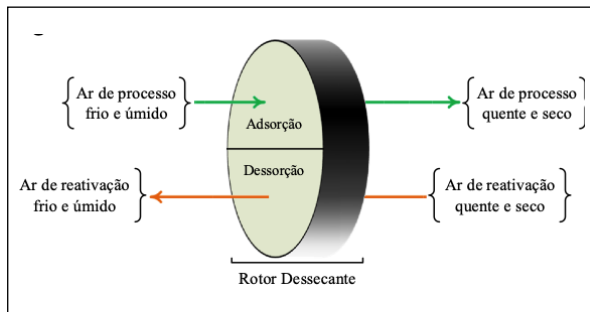
Nesse sentido, como alternativa aos sistemas de climatização convencionais, existem os sistemas de climatização dessecantes. Estes são compostos por rotores adsorptivos e trocadores de calor, assim o sistema é capaz de atuar nas cargas de calor sensíveis e latentes existentes nas correntes de ar de

climatização, de forma simultânea e independente. Diferentemente dos sistemas de climatização convencionais por compressão de vapor, os sistemas de climatização dessecantes são vistos como alternativas ambientalmente amigáveis, tendo em vista que não fazem uso de gases refrigerantes e podem usar fontes alternativas e renováveis de energia. Além disso, essa tecnologia de climatização permite realizar a total renovação da massa de ar do ambiente climatizado e garantir a eliminação de concentrações de substâncias nocivas, como o dióxido de carbono (CO₂), por exemplo. E atualmente com os efeitos da pandemia, esse sistema pode reduzir o risco de contaminação dos ocupantes dos ambientes climatizados, uma vez que promove 100% de renovação de ar.

Os rotores adsorptivos podem ser de efeito ativo ou de efeito passivo. Os de efeito ativo são normalmente conhecidos como rotores dessecantes; os de efeito passivo são conhecidos como rotores entálpicos. A constituição desses dispositivos é feita basicamente a partir de dois materiais. Em formato cilíndrico, eles são produzidos por substratos condutores e de sólidos adsorventes com afinidade com a umidade do ar (vapor d'água).

Os rotores dessecantes trabalham entre duas correntes de ar, uma delas deve ser aquecida. A principal função desses dispositivos é desumidificar as correntes de ar a partir da retenção da umidade nos poros do sólido adsorvente fixado nos substratos. Na Figura 1 está ilustrado o funcionamento de um rotor dessecante.

Figura 1 – Funcionamento de um rotor dessecante



Fonte: elaborada pelos autores

A corrente de ar desumidificada é denominada ar de processo; ela pode ser usada para climatizar diferentes ambientes fechados. A corrente de ar aquecida é chamada ar de reativação; ela serve para aquecer a umidade retida no sólido adsorvente, para que assim evapore e seja retirada do sólido adsorvente.

O processo de desumidificação recebe a denominação de adsorção, e o processo de expulsão da umidade do sólido recebe a denominação de dessorção. Ambos ocorrem quando a matriz gira a velocidade constante e faz as áreas de adsorção e dessorção entrarem, alternadamente, em contato com as correntes de ar que cruzam o rotor em sentidos contrários.

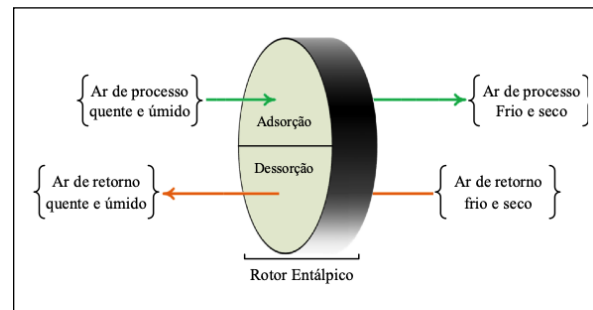
O uso do rotor dessecante em aplicações específicas oferece vantagens sobre a tecnologia convencional de desumidificação realizada a partir de serpentinas de resfriamento (KORONAKI *et al.*, 2016).

Para os sistemas de climatização dessecantes, um dos principais desafios é obter bons níveis de desumidificação, reduzindo ao máximo o consumo da energia usada na reativação do sólido adsorvente. A reativação ocorre quando a umidade do ar é expulsa do sólido adsorvente, restaurando seu potencial adsorvente. Quanto maior for o nível de adsorção, ou seja, de desumidificação desejada do rotor dessecante, maior será a temperatura de reativação e, conseqüentemente, maior será o consumo da fonte de energia.

Nesse contexto, o presente estudo foi realizado para investigar experimentalmente, em um sistema de climatização dessecante, o impacto da inserção de um rotor entálpico na estrutura do sistema na efetividade de desumidificação e na redução do consumo de energia de reativação do sólido adsorvente do rotor dessecante.

Os rotores entálpicos são semelhantes aos rotores dessecantes, porém, não requerem que uma de suas correntes de ar seja aquecida. Esses rotores geralmente possuem menor quantidade de material adsorvente, giram com velocidades maiores e têm maiores dimensões. Na Figura 2 está ilustrado o funcionamento de um rotor entálpico.

Figura 2 – Funcionamento de um rotor entálpico



Fonte: elaborada pelos autores

De acordo com Radov *et al.* (2008), a capacidade do rotor entálpico depende da pressão do vapor d'água. Essa pressão pode mudar devido à diferença de temperatura e umidade do ar de processo e do ar de retorno. Seu funcionamento inicia-se com o material adsorvente retendo a umidade da corrente de ar quente e úmido na área de adsorção. Quando a matriz cilíndrica gira, faz essa área entrar em contato com a corrente de ar frio e seco, nesse momento a umidade retida no sólido é evaporada e extraída da matriz. O resultado desse processo torna o ar de processo frio e seco, e o ar de retorno quente e úmido.

Historicamente, de acordo com Jeong e Mumma (2005), os rotores entálpicos foram introduzidos nos EUA em meados de 1960, com a criação de uma matriz com substrato em papel impregnada de LiCl. Em 1970, dois novos tipos de rotores foram desenvolvidos, um com matriz em alumínio oxidado e o outro com matriz cilíndrica em alumínio e sílica gel. Somente em 1980, foram desenvolvidos rotores entálpicos com peneira molecular como sólido adsorvente.

Os resultados obtidos nesta pesquisa mostram os benefícios da associação do rotor entálpico ao rotor dessecante, tanto na efetividade de desumidificação quanto no consumo de energia na reativação do adsorvente dos rotores dessecantes.

2 Referencial teórico

Diferentes estudos envolvendo rotores adsorptivos já foram realizados em diversas literaturas. Todos a partir de modelagens ou avaliações experimentais e buscando melhorar a eficiência dos dispositivos ou mesmo desenvolver novas categorias. Analiticamente, em Shang e Besant (2005) foi avaliado o efeito da variação aleatória do tamanho dos poros do material adsorptivo dos canais de passagem do ar de um rotor, demonstrando que grandes variações no tamanho dos poros diminuem significativamente a queda de pressão e a eficácia do dispositivo. Sphaier e Worek (2006) compararam uma modelagem bidimensional com outra unidimensional. A ênfase desse estudo residiu na determinação de faixas de aplicabilidade do modelo unidimensional simplificado. Os resultados sugeriram que a modelagem unidimensional poderia ser empregada em rotores dessecantes, ao passo que, para os rotores entálpicos, uma modelagem bidimensional mais robusta seria necessária para determinados parâmetros de projeto e operações. Zhai, Archer e Fischer (2006) testaram o desempenho de um rotor entálpico no Intelligent Workplace (IW) da Carnegie Mellon University (CMU). Os resultados desse estudo, realizado no inverno, indicaram que o rotor entálpico reduziu a carga de aquecimento durante a ventilação do IW em 77%. Os testes de campo mostram-se compatíveis com dados obtidos em testes de laboratório – nesses o rotor apresentou 82% de eficácia na recuperação de calor sob as mesmas condições de fluxos de ar. Chung e Lee (2009), a partir de simulações numéricas, avaliaram um rotor dessecante tomando como parâmetros investigativos a velocidade de rotação e a proporção da área de dessorção para temperaturas de reativação entre 50 °C e 150 °C. O desempenho do dispositivo foi avaliado a partir da capacidade de remoção da umidade observando o comportamento da isoterma de adsorção. Uçkan *et al.* (2013) desenvolveram um sistema dessecante com o objetivo de aumentar o desempenho do processo de climatização em um clima quente e úmido, no qual foram usados um rotor dessecante, três trocadores de calor sensíveis, dois resfriadores evaporativos e um aquecedor de ar a gás. Com uma vazão de 3000 m³/h para o ar de processo e temperatura de reativação de 110 °C, os resultados da configuração apresentada mostraram uma redução na temperatura do ar de processo de

35 °C para 14 °C na entrada do ambiente climatizado e uma capacidade de climatização de aproximadamente 19,67 kW com COP entre 0,64 e 0,76. Tu, Liu e Jiang (2013) desenvolveram um modelo matemático a partir do qual foram analisados os efeitos de parâmetros como o substrato, a mistura de ar e a velocidade de rotação dos rotores sobre o desempenho de rotores entálpicos e dessecantes. Melo (2015) realizou um estudo experimental no qual caracterizou um rotor dessecante e um rotor entálpico. Nesse estudo, o rotor dessecante foi avaliado sob a influência da temperatura de reativação e da velocidade de rotação. O rotor entálpico foi avaliado a partir da velocidade de rotação e das vazões de ar. Em Silva, Medeiros e Gurgel (2016) foi realizado um estudo teórico-experimental sobre o comportamento e o desempenho de um rotor dessecante funcionando sob as condições climáticas da cidade de João Pessoa. O problema consistiu em analisar o rotor, a partir do qual foi testado e validado um modelo matemático unidimensional, transiente, envolvendo as transferências de calor e massa na corrente fluida e na matriz adsorptiva do rotor, composto por equações de conservação de massa e de energia, uma isoterma de adsorção e relações psicrométricas. Em El-Maghlany *et al.* (2017) foi desenvolvido um sistema de climatização dessecante a partir de um rotor entálpico e de um rotor trocador de calor sensível. O sistema foi usado para melhorar o desempenho térmico de sistemas usados para condicionar o ar de edifícios que apresentavam grande consumo de energia. Çiftçi e Sözen (2017) avaliaram numericamente o desempenho de um rotor entálpico. Utilizando CFD (Computational Fluid Dynamics), a eficiência do rotor foi investigada para uma velocidade de rotação ideal. Com a ajuda do software ANSYS, a distribuição de temperatura foi apresentada graficamente e verificou-se que a eficiência máxima do rotor foi de 52,62%. Niemann e Schmitz (2019) desenvolveram um sistema de climatização composto por um rotor entálpico, um trocador de calor rotativo, um sistema convencional de condicionamento de ar e um sistema geotérmico. O sistema foi projetado para usar uma grande quantidade de energia renovável e reduzir a demanda de eletricidade para o ar-condicionado. Os principais objetivos desse estudo foram a investigação do desempenho geral do sistema e a avaliação do fornecimento de calor geotérmico durante o inverno.

3 Materiais e método da pesquisa

3.1 Materiais

O rotor dessecante empregado na presente investigação tinha diâmetro de 550 mm, espessura de 200 mm, substrato em fibra e silicato ativado como sólido adsorvente. O rotor entálpico tinha diâmetro de 700 mm, espessura de 270 mm, substrato em alumínio e sílica gel como sólido adsorvente. Na Figura 3 estão os rotores adsortivos empregados na presente investigação.

Figura 3 – Rotores adsortivos: (a) rotor dessecante e (b) rotor entálpico



(a) (b)

Fonte: elaborada pelos autores.

As vazões das correntes de ar de processo, reativação e retorno foram 0,299 kg/s (909 m³/h) no primeiro teste e 0,3962 kg/s (1204 m³/h) no segundo teste. As velocidades de rotação foram 15 rph para o rotor dessecante e 25 rpm para o rotor entálpico. Para o ar de reativação foram usadas temperaturas aproximadas de 50 °C, 65 °C e 80 °C, tendo como fonte de aquecimento para o ar de reativação a queima de GNV (Gás Natural Veicular).

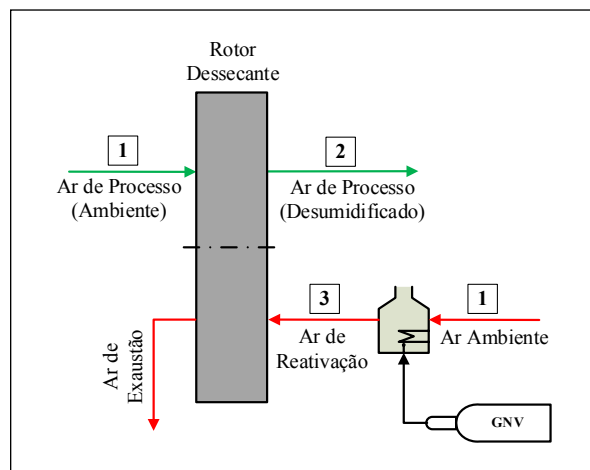
3.2 Método

A efetividade da desumidificação do ar e o consumo de energia foram investigados a partir da atuação individual do rotor dessecante e, em um segundo caso, a partir da atuação conjunta dos dois rotores adsortivos. Nesse sentido, foram estruturadas duas bancadas de testes, a partir das quais os resultados obtidos definiram a importância da inserção dos rotores entálpicos nos sistemas de climatização dessecantes.

Na Figura 4 está ilustrada a montagem da primeira bancada, sendo que as numerações indicam os pontos onde foram coletados os dados relevantes para o

conhecimento dos estados termodinâmicos de cada uma das correntes de ar.

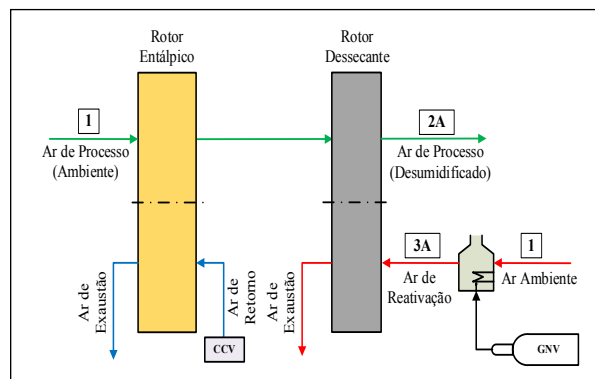
Figura 4 – Primeira bancada, atuação individual do rotor dessecante



Fonte: elaborada pelos autores

A montagem da segunda bancada está ilustrada na Figura 5. De forma análoga, as numerações indicam os pontos onde foram coletados os dados relevantes para o conhecimento dos estados termodinâmicos das correntes de ar.

Figura 5 – Segunda bancada de testes



Fonte: elaborada pelos autores

Na montagem da segunda bancada, ilustrada na Figura 5, o ar apresenta no ponto 2A a sua umidade mais reduzida em comparação com o ponto 2 da montagem 1, em virtude da inserção do rotor entálpico. Em sistemas de climatização dessecantes, as correntes de ar nos pontos 2 e 2A, de ambas as bancadas, devem ter seu calor sensível previamente reduzidas antes de serem enviadas para o ambiente

climatizado. Esse processo foge ao escopo do presente trabalho.

A efetividade de desumidificação pode ser influenciada por parâmetros como vazões das correntes de ar, temperaturas de reativação, umidade das correntes de ar, tipo de sólido adsorvente dos rotores, tempo de contato entre o sólido e as correntes de ar, tipo de substrato, perfil dos canais de passagem de ar, diâmetro, espessura e velocidades de rotação das matrizes cilíndricas dos rotores adsorventes, bem como pelas condições ambientais externas aos ambientes climatizados.

A efetividade de desumidificação define a capacidade que cada rotor apresenta, em determinadas condições de trabalho, de retirar a umidade do ar de processo. Não foi foco da presente investigação avaliar as efetividades individuais de cada rotor, e sim a efetividade do processo de desumidificação a partir de cada bancada de testes. Dessa forma foi possível observar os benefícios trazidos ao sistema de climatização dessecante por conta da inserção do rotor entálpico.

3.2.1 Efetividade de desumidificação

A expressão da efetividade de desumidificação para a primeira bancada foi dada a partir da efetividade latente do rotor dessecante. De acordo com Ruivo *et al.* (2012) e Jani, Mishra e Sahoo (2015), essa efetividade pode ser calculada por meio da Equação (1)

$$\varepsilon_1 = \frac{(w_1 - w_2)}{w_1} \quad (1)$$

Para mensurar a capacidade de desumidificação da segunda bancada, a expressão da efetividade da primeira bancada foi reescrita para os pontos 1 e 2A. Dessa forma, a efetividade da segunda bancada foi obtida a partir da Equação (2).

$$\varepsilon_2 = \frac{(w_1 - w_{2A})}{w_1} \quad (2)$$

Nas Equações (1) e (2), w_1 é a razão de umidade do ar de processo na entrada da matriz do rotor entálpico; w_2 é a razão de umidade do ar de processo na saída do rotor dessecante; w_{2A} é a razão de umidade do ar de processo na saída do rotor dessecante após a inserção do rotor entálpico no sistema.

3.2.2 Energia térmica de reativação

A energia térmica por unidade de tempo (ou potência térmica) usada no processo de reativação do sólido adsorvente do rotor dessecante é dada por (\dot{Q}). Neste caso, para mensurar a quantidade fornecida durante o aquecimento da corrente de ar de reativação, foram obtidas as entalpias do ar antes e depois do aquecimento. A quantificação da potência térmica de reativação na primeira bancada foi realizada usando a Equação (3).

$$\dot{Q}_1 = m_{ar} \times (h_3 - h_1) \quad (3)$$

De forma análoga, a quantificação da potência térmica de reativação da segunda bancada foi realizada usando a Equação (4).

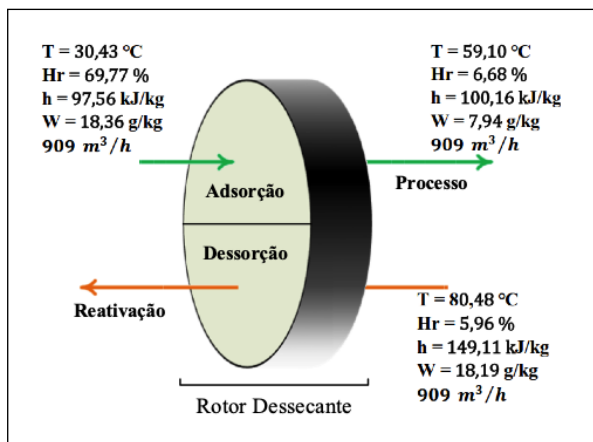
$$\dot{Q}_2 = m_{ar} \times (h_{3A} - h_1) \quad (4)$$

Nas Equações (3) e (4), m_{ar} é a vazão mássica das correntes de ar; h_1 é a entalpia do ar ambiente antes do aquecimento; h_3 , h_{3A} são as entalpias do ar após aquecimento em cada uma das bancadas, respectivamente.

4 Resultados e discussão

Antes de serem apresentados os resultados gerais, uma comparação entre dois estudos de caso deve ser evidenciada. Na Figura 6 está ilustrado o caso 1, no qual foi investigada a atuação individual do rotor dessecante. Para cada corrente de ar são apresentados os valores médios da temperatura (T), da umidade relativa (Hr), da entalpia (h) e da razão de umidade (w). As vazões de ar usadas foram 0,299 kg/s (909 m³/h), com uma temperatura de reativação de 80,48 °C.

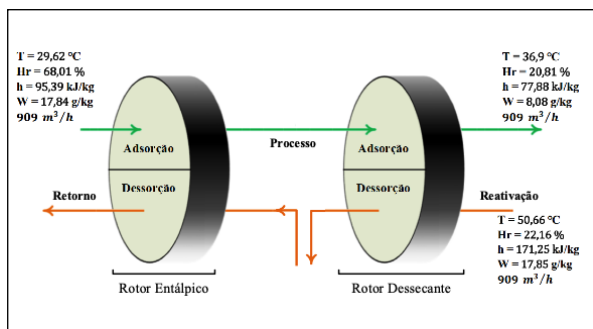
Figura 6 – Atuação individual do rotor dessecante (Caso 1)



Fonte: elaborada pelos autores

Na Figura 7 está ilustrado o caso 2, no qual a atuação conjunta dos rotores entálpico e dessecante é evidenciada para efeito de comparação com o caso 1. Nesta ocasião, as correntes de ar também foram 0,299 kg/s (909 m³/h), porém com uma temperatura de reativação de 50,66 °C.

Figura 7 – Atuação conjunta dos rotores (Caso 2)



Fonte: elaborada pelos autores

Observando a atuação conjunta dos rotores no caso 2, foi constatado que a desumidificação atingiu 9,76 g de vapor de água/kg de ar seco, ou seja, (17,84 - 8,08 = 9,76), e foi inferior ao resultado obtido da atuação individual do rotor dessecante (caso 1), ou seja, 10,42 g de vapor de água/kg de ar seco,

(18,36 - 7,94 = 10,42). Observando que a temperatura de reativação no caso 2 foi de 50,66 °C, ao passo que a do caso 1 foi de 80,48 °C. Constatou-se, portanto, a boa compatibilidade dos níveis de desumidificação, com menor consumo de energia de reativação na atuação conjunta dos rotores.

Em termos de efetividade de desumidificação, a atuação individual do rotor dessecante apresentou (ϵ_1) de 56,75%, enquanto a atuação conjunta dos rotores apresentou (ϵ_2) de 54,71%. A diferença de 2,04% entre os valores das efetividades pode ser considerada desprezível, uma vez que para o caso 2 ela corresponde, em média, a 0,36 g de vapor de água/kg de ar seco.

Avaliando a importância do rotor entálpico no consumo de energia de reativação, no caso 1, para aquecer o ar da temperatura ambiente de 30,43 °C para 80,48 °C, foram usados 15,41 kW de energia térmica para reduzir de 10,42 g de vapor de água/kg de ar seco, em média, a razão de umidade do ar de processo. No caso 2, para aquecer o ar da temperatura ambiente de 29,62 °C para 50,66 °C, foram usados 6,54 kW para reduzir de 9,76 g de vapor de água/kg de ar seco, em média, a razão de umidade do ar de processo. Comparando o caso 2 ao caso 1, notou-se que a inserção do rotor entálpico fez alcançar uma redução de 57,6% na energia consumida no aquecimento do ar de reativação.

Nas vazões de 1204 m³/h (0,3962 kg/s), os resultados foram semelhantes aos anteriormente mostrados. Com a inserção do rotor entálpico para a atuação em conjunto com o rotor dessecante, a efetividade (ϵ_2) foi de 49,23%, ao passo que a efetividade (ϵ_1) foi de 49,40%. Quanto ao consumo de energia de reativação do sólido adsorvente, conjuntamente, os rotores reduziram, em média, 61,82%.

Nas Tabelas 1 e 2, respectivamente, estão os resultados da primeira e da segunda bancada usando vazões de 909 m³/h (0,299 kg/s) em diferentes temperaturas de reativação. São mostrados os valores das temperaturas (T), das umidades absolutas (w), das efetividades de desumidificação e a energia térmica consumida no processo de reativação (\dot{Q}).

Tabela 1 – Resultados da primeira bancada com vazões de 0,299 kg/s (909 m³/h)

Ar de processo				Ar de reativação		
Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		
T (°C)	w (g/kg)	T (°C)	w (g/kg)	T (°C)	ϵ_1 (%)	\dot{Q}_1 (kW)
29,42	18,67	42,93	13,51	50,67	27,6	6,36
29,88	17,93	51,48	11,28	65,40	37,1	10,87
30,03	18,67	60,30	9,43	80,42	49,5	15,44

Fonte: dados da pesquisa

Tabela 2 – Resultados da segunda bancada com vazões de 0,299 kg/s (909 m³/h)

Ar de processo				Ar de reativação		
Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		
T (°C)	w (g/kg)	T (°C)	w (g/kg)	T (°C)	ϵ_2 (%)	\dot{Q}_2 (kW)
31,38	20,3	40,0	10,1	51,9	49,9	6,41
31,32	19,8	46,6	8,2	65,9	58,7	10,78
29,87	19,4	53,3	6,0	80,4	69,1	15,75

Fonte: dados da pesquisa

Nas Tabelas 3 e 4, respectivamente, estão os resultados da primeira e da segunda bancadas usando vazões de ar de 0,3962 kg/s (1204 m³/h).

Comparando as desumidificações da primeira bancada com as da segunda, nas mesmas vazões de ar, observou-se que, em todas as temperaturas de reativação, os maiores níveis de desumidificação foram obtidos na segunda bancada. Em termos de efetividades, nota-se um expressivo crescimento durante a atuação conjunta à medida que é aumentada a temperatura de reativação.

Em termos de temperatura de reativação observa-se que, na mesma vazão, à medida que é aumentada a temperatura de reativação, o consumo de energia é semelhante. Porém, se comparamos os resultados obtidos com a menor temperatura de reativação na atuação conjunta com aqueles obtidos em todas as temperaturas de reativação para o rotor dessecante atuando isoladamente, nota-se que tanto os resultados das efetividades quanto os dos consumos de energia de reativação são melhores na atuação conjunta dos rotores.

Tabela 3 – Resultados da primeira bancada com vazões de 0,3962 kg/s (1204 m³/h)

Ar de processo				Ar de reativação		
Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		
T (°C)	w (g/kg)	T (°C)	w (g/kg)	T (°C)	ϵ_1 (%)	\dot{Q}_1 (kW)
29,0	19,4	42,0	14,4	49,93	25,0	8,46
29,4	19,6	51,4	12,6	65,43	35,5	14,6
29,5	19,9	60,1	10,0	80,75	49,4	21,1

Fonte: dados da pesquisa

Tabela 4 – Resultados da segunda bancada com vazões de 0,3962 kg/s (1204 m³/h)

Ar de processo				Ar de reativação		
Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		
T (°C)	w (g/kg)	T (°C)	w (g/kg)	T (°C)	ϵ_2 (%)	\dot{Q}_2 (kW)
30,2	19,7	37,92	10,03	49,78	49,23	8,06
29,6	20,3	45,92	7,78	65,97	61,80	14,98
29,0	19,9	52,00	6,42	80,10	67,85	21,07

Fonte: dados da pesquisa

CEm termos de vazões, tomando uma mesma temperatura de reativação, percebe-se que o aumento da vazão apresentou uma leve redução na efetividade de desumidificação, evidenciando melhores resultados na menor vazão.

A comparação com os resultados de outros trabalhos ampliaria ainda mais a visão sobre o assunto em tela, porém não foram encontrados na literatura trabalhos similares que viabilizassem tal procedimento. É importante ressaltar que o presente trabalho foi realizado em caráter experimental, e trabalhos com essa característica são raros acerca desse assunto.

5 Conclusão

Os rotores dessecantes foram pensados para reduzir os altos níveis da razão de umidade de correntes de ar direcionadas a ambientes climatizados. Tal objetivo pode ser alcançado empregando no sistema mais de um rotor dessecante ou usando altas temperaturas para obter a energia térmica necessária à reativação dos sólidos adsorventes presentes nos rotores. Porém, para o presente trabalho, a primeira

alternativa poderia tornar a construção do sistema inviável do ponto de vista de custos dos equipamentos. Quanto à segunda alternativa, a construção do sistema poderia ser inviabilizada, uma vez que a possibilidade da utilização de fontes alternativas de energia, como a solar, por exemplo, ou o uso de resíduos térmicos seriam extintos.

A contribuição do presente trabalho residiu no fato de que a inserção do rotor entálpico no sistema de climatização dessecante estudado promoveu um menor consumo de energia térmica de reativação do rotor dessecante, pois previamente reduziu significativamente a razão de umidade do ar de processo, fazendo com que baixas temperaturas de reativação pudessem ser usadas na reativação do rotor dessecante. Além disso, a atuação prévia do rotor entálpico aumentou a eficiência de desumidificação do sistema de forma geral. Deve ser somado a isso, também, que a presença do rotor entálpico no sistema extinguiu a necessidade de mais de um rotor dessecante, o que contribuiu para a redução dos custos de construção do sistema.

Ficou provado que o rotor entálpico é um dispositivo de grande importância para os sistemas de climatização dessecantes e que seu uso não deve ser descartado, principalmente em regiões de climas com altos índices de razão de umidade do ar.

Como trabalhos futuros, no intuito de alcançar resultados significativos quanto à redução de energia térmica de reativação e quanto à eficiência do processo de climatização no que tange ao COP do sistema e às condições adequadas de temperatura e umidade do ar, trabalhos futuros serão realizados a partir de um sistema de climatização híbrido, no qual a atuação conjunta dos rotores apresentada no presente trabalho se juntará à atuação de um sistema de climatização convencional por compressão de vapor e também à atuação de um regenerador de calor dinâmico, também conhecido como rotor sensível ou trocador de calor sensível.

AGRADECIMENTOS

Neste trabalho, os agradecimentos devem ser prestados à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por todo apoio e incentivos concedidos aos autores.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, R. P. L.; MELLO, H. M.; SOUZA, H. P. Avaliação de desempenho térmico em salas de aula no Alto Sertão da Paraíba – estudo de caso no IFPB, Campus Cajazeiras. **Revista Principia – Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, n. 42, p. 50-58, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n42p50-58>.
- CHUNG, J. D.; LEE, D.-Y. Effect of desiccant isotherm on the performance of desiccant wheel. **International Journal of Refrigeration**, v. 32, n. 4, p. 720-726, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.01.003>.
- ÇİFTÇİ, E.; SÖZEN, A. Numerical investigation of a heat wheel performance used for enthalpy recovery applications. **Research on Engineering Structures & Materials**, v. 3, n. 3, p. 202-209, 2017. DOI: <http://doi.org/10.17515/resm2016.60en0711>.
- EL-MAGHLANY, W. M.; ELHEFNI, A. A.; ELHELW, M.; ATTIA, A. Novel air conditioning system configuration combining sensible and desiccant enthalpy wheels. **Applied Thermal Engineering**, v. 127, p. 1-15, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.020>
- JANI, D. B.; MISHRA, M.; SAHOO, P. K. Performance studies of hybrid solid desiccant–vapor compression air-conditioning system for hot and humid climates. **Energy and Buildings**, v. 102, p. 284-292, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.055>.
- JEONG, J.-W.; MUMMA S. A. Practical thermal performance correlations for molecular sieve and silica gel loaded enthalpy wheels. **Applied Thermal Engineering**, v. 25, n. 5-6, p. 719-740, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.07.018>.
- KORONAKI, I. P.; PAPOUTSIS, E.; PAPAETHIMIOU, V.; ROGDAKIS, E. Numerical and experimental analysis of a solid desiccant wheel. **Thermal Science**, v. 20, n. 2, p. 613-621, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI141118041K>.
- MELO, F. J. A. **Caracterização de rotores adsorptivos para composição de sistemas de climatização por adsorção**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/7579>. Acesso em: 10 set. 2020.
- NIEMANN, P.; SCHMITZ, G. Experimental investigation of a ground-coupled air conditioning

system with desiccant assisted enthalpy recovery during winter mode. **Applied Thermal Engineering**, v. 160, p. 114017, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114017>.

RADOV, M.; MOHAMMAD, M.; VASQUEZ, J.; LI, A.; LIN, B. **The enthalpy wheel**: The most efficient energy recovery system. San Jose: San Jose State University, 2008. Disponível em: https://vsgc.odu.edu/acrpdesigncompetition/wp-content/uploads/sites/3/2018/11/2009Environment_al_thirdplace.pdf. Acesso em: 10 set. 2020.

RAMOS, D. S.; SUSTERAS, G. L. Utilização de algoritmos genéticos para previsão da contratação de energia pelas distribuidoras. **IEEE Latin America Transactions**, v. 4, n. 4, p. 268-278, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/TLA.2006.4472123>.

RUIVO, C. R.; CARRILLO-ANDRÉS, A.; COSTA, J. J.; DOMÍNGUEZ-MUÑOZ, F. Interpolation procedures for the effectiveness method to account for the influence of the inlet airflow states on the desiccant wheels performance. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 380-388, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.028>.

SHANG, W.; BESANT, R. W. Effects of pore size variations on regenerative wheel performance. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 127, n. 1, p. 121-135, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.1804539>.

SILVA, M. G.; MEDEIROS, J. M.; GURGEL, J. M. A. M. Estudo teórico e experimental da tecnologia dessecante aplicada ao condicionamento de ar em João Pessoa. **Revista Principia – Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, n. 31, p. 62-75, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n31p60-74>.

SPHAIER, L. A.; WOREK, W. M. Comparisons between 2-D and 1-D formulations of heat and mass transfer in rotary regenerators. **Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals**, v. 49, n. 3, p. 223-237, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10407790500434166>.

TU, R.; LIU, X.-H.; JIANG, Y. Performance comparison between enthalpy recovery wheels and dehumidification wheels. **International Journal of Refrigeration**, v. 36, n. 8, p. 2308-2322, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.07.014>.

UÇKAN, I.; YILMAZ, T.; HÜRDOGANA, E.; BÜYÜKALACA, O. Experimental investigation of a novel configuration of desiccant based evaporative air conditioning system. **Energy Conversion and**

Management, v. 65, p. 606-615, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.09.014>.

ZHAI, C.; ARCHER, D. H.; FISCHER, J. C. The performance of an enthalpy recovery wheel in ventilation of CMU's IW. In: ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, 2006, Chicago. **Proceedings (...)**. Chicago: The American Society of Mechanical Engineers, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1115/IMECE2006-13763>.