

Estudo teórico e experimental da tecnologia dessecante aplicada ao condicionamento de ar em João Pessoa



Márcio Gomes da Silva ^[1], Jesus Marlinaldo de Medeiros ^[2], José Maurício Alves de Matos Gurgel ^[3]

[1] mgcefet@gmail.com, [2] jesus_medeiros@yahoo.com.br, [3] jm.gurgel@cear.ufpb.br- ¹IFPB – 1º de maio, 720, Jaguaribe, João Pessoa-PB; ²IFPB – Sta Rita de Cássia, Camboinha, Cabedelo-PB; ³UFPB - , Centro de Energias Alternativas e Renováveis, João Pessoa-PB.

RESUMO

Os rotores dessecantes são trocadores rotativos de calor e massa, tipo ar-ar, impregnados com material adsorvente, utilizados para desumidificação do ar úmido. Neste trabalho, é realizado um estudo teórico-experimental sobre o comportamento/desempenho de um rotor dessecante, usado para sistema de condicionamento de ar dessecante, funcionando sob as condições climáticas da cidade de João Pessoa. O problema consiste de um rotor cilíndrico rotativo, tipo Honeycomb, impregnado de material dessecante, através do qual passam dois fluxos de ar contrários: um de processo (adsorção) e outro de regeneração (dessorção). Foi testado e validado um modelo matemático unidimensional, transiente, envolvendo as transferências de calor e massa na corrente fluida e na matriz adsorvente, sendo composta por equações de conservação de massa e de energia, uma isoterma de adsorção e relações psicrométricas. Esse sistema de equações foi discretizado via método dos volumes finitos, formulação totalmente implícita, com arranjo desencontrado. O procedimento numérico para solução utilizou a técnica iterativa de Gauss-Seidel com sub-relaxação e o algoritmo de Thomas (TDMA). Os resultados indicam que o modelo matemático necessita de aprimoramento para representar com maior precisão os resultados experimentais, pois apresentaram erros relativos máximos de 10% para temperatura e 14 % para razão de umidade.

Palavras-chave: Condicionamento de ar. Rotor dessecante. Dados experimentais. Modelagem matemática. Simulação numérica.

ABSTRACT

The desiccant rotor is rotating heat and mass exchangers air-to-air, impregnated with adsorbent material used for dehumidification of moist air. This work is carried out an experimental theoretical study on the behavior / performance of a desiccant rotor, used for desiccant air conditioning system operating under the climatic conditions of the city of João Pessoa. The problem consists of a rotating cylindrical rotor, honeycomb type impregnated with desiccant material through which pass two opposite air flows: a process (adsorption) and other regeneration (desorption). It has been tested and validated a mathematical one-dimensional transient model, involving heat and mass transfer in the fluid stream and adsorptive matrix, consisting of mass conservation equations and energy, adsorption isotherm and psychrometric relations. This system of equations was discretized by finite volume method, fully implicit formulation, with a staggered arrangement. The numerical solution procedure used for the iterative Gauss-Seidel technique with under-relaxation and Thomas algorithm (TDMA). The results indicate that the mathematical model require enhancement to represent more accurately the experimental results, as presented maximum relative error of 10% temperature and 14% for moisture ratio.

Keywords: Air-conditioning. Desiccant rotor. Experimental data. Mathematical modeling. Numerical simulation.

1 Introdução

1.1 Tecnologia dessecante

Para obter a refrigeração artificialmente existem inúmeros sistemas, métodos ou ciclos, porém o mais eficiente, difundido e usado é o sistema de refrigeração por compressão de vapor. Devido à sua versatilidade em atingir diferentes temperaturas de operação, esse sistema pode ser usado onde se precisa de congelamento, conservação e condicionamento de ambientes, indistintamente, bastando para isso adequar o projeto de seus componentes e ciclo à situação requerida.

Durante um período de tempo significativo, a refrigeração por compressão de vapor caminhou a passos largos sem nenhuma restrição. No entanto, no início dos anos de 1990, embasados em estudos sob as condições climáticas, cientistas afirmaram que os fluidos refrigerantes, usados nos sistemas de refrigeração por compressão de vapor, principalmente os CFCs, quando liberados para a atmosfera, além de provocar o efeito estufa, também degradavam a camada de ozônio que protege a terra da radiação nociva vinda do espaço. Baseados nessas constatações, os gases, até então largamente usados, tiveram seu uso reduzido e, em alguns casos, não puderam mais ser usados nem fabricados. O marco que mostra a importância da redução da emissão dos gases poluentes para a atmosfera é o Protocolo de Kyoto (MOREIRA; GIOMETTI, 2008). Esse talvez tenha sido o maior impacto negativo sofrido pela tecnologia da refrigeração por compressão de vapor que se tem registro.

Desde então, os estudos sobre outras formas de se obter refrigeração artificial foram intensificados, e entre os sistemas alternativos ao de compressão de vapor temos os de: absorção, adsorção, termoelétrico (Efeito Peltier) etc.

Além disso, no cenário de crise internacional, a demanda energética mundial continua aumentando a cada ano, devido ao crescimento populacional e suas transformações socioeconômicas. Contudo, a oferta de energia não acompanha esse crescimento, sendo necessária sua utilização racional e otimizada. Consequentemente, deve-se buscar por investimentos em matrizes energéticas limpas que não contribuam para

a degradação do meio ambiente, fator indispensável ao desenvolvimento sustentável das futuras gerações.

Nesse contexto, os sistemas de condicionamento de ar têm sido cada vez mais usados em todo o mundo, gerando grande consumo de energia. Atualmente, novas tecnologias de resfriamento têm sido estudadas para substituição dos sistemas convencionais (compressão a vapor), pois seu uso intenso pode levar a um colapso tanto energético quanto ambiental.

Uma das alternativas promissoras é a tecnologia dessecante (adsortiva evaporativa), composta pela desumidificação adsortiva em conjunto com o resfriamento evaporativo, para proporcionar redução no consumo de energia, melhorar a qualidade do ar interno, aumentar o conforto térmico e diminuir a agressão ambiental dos fluidos refrigerantes atuais.

O resfriamento evaporativo é um processo natural que consiste na redução da temperatura do ar e elevação de sua umidade relativa, por meio de mecanismos simultâneos de transferência de calor e massa entre o ar e a água. Tem como atrativos e benefícios: o baixo consumo de energia, facilidades de manutenção, de instalação, de operação e de integração a sistemas de condicionamento de ar já instalados. Além do mais, pode trabalhar com renovação total do ar, eliminando a recirculação e a proliferação de fungos e bactérias, o que, por sua vez, eleva a qualidade do ar do recinto, além de não usar fluidos poluentes. Apesar da sua simplicidade e do baixo custo de aquisição e operação, a redução de temperatura obtida no resfriador evaporativo depende muito mais da umidade relativa do que da temperatura de entrada. Por essa razão, para clima quente e seco é útil, mas ineficiente para clima úmido.

A eficiência de um sistema de resfriamento evaporativo varia de acordo com as condições do clima, sendo mais eficiente em dias quentes e secos. O consumo de energia elétrica desse sistema chega a ser, dependendo das condições climáticas do ar externo, de 40% a 80% menor do que o consumo de um sistema de condicionamento de ar por compressão (FREITAS, 2007).

A Adsorção é o fenômeno de superfície no qual um soluto é removido de uma fase fluida e acumulado na superfície de uma fase sólida. O material adsorvido é denominado de adsorbato, e o material sobre o

¹ Maiores detalhes podem ser encontrados em (site: <http://www.wwf.org.br>), consultado em 10/12/2015

qual o soluto é depositado é chamado de adsorvente (RUTHVEN, 1984).

Em geral, os adsorventes são materiais sólidos porosos com grande área superficial localizada no seu interior. A água adsorvida é contida por condensação dentro dos capilares formados na própria estrutura cristalina do material. A capacidade de um adsorvente, para atrair umidade, depende do tamanho de seus poros e da relação entre a quantidade de água em sua superfície e o conteúdo de umidade do ar. Essa diferença se reflete na pressão de vapor na superfície e no ar.

Todo dessecante atrai e retém umidade até alcançar um equilíbrio com o ar ambiente. A umidade é usualmente removida, aquecendo o dessecante a temperaturas entre 50 °C e 320 °C, expondo-o a um fluxo de ar de regeneração ou reativação. A temperatura de reativação depende do tipo de material adsorvente utilizado e da aplicação. A energia para a reativação pode ser uma fonte elétrica ou uma fonte térmica através do vapor de água, do ar quente ou de um rejeito industrial qualquer. Depois de seco, o dessecante deve ser resfriado para que possa reter a umidade novamente, ou seja, o processo é regenerativo, pois a substância adsorvente, após estar saturada de umidade, permite a liberação de água quando submetida a um aquecimento regenerativo (dessorção).

A capacidade de adsorção de um dessecante é fator importantíssimo em um meio dessecante, sendo caracterizada pela existência do equilíbrio termodinâmico entre a fase adsorvida, o vapor de água existente na mistura gasosa e a matriz dessecante.

A desumidificação por resfriamento é um processo no qual o fluxo de ar é resfriado até uma temperatura inferior à sua temperatura de orvalho e parte do vapor de água da mistura vai se condensar, reduzindo a temperatura de bulbo seco e a razão de umidade.

A desumidificação por adsorção é um processo em que o vapor de água é adsorvido por um material adsorvente, provocando no fluxo de ar aumento da temperatura de bulbo seco e redução da razão de umidade.

O resfriamento adsorvente evaporativo consiste na desumidificação do ar externo (atmosférico), forçando-o a passar através de um material adsorvente, onde parte do vapor de água será retido e o ar terá sua razão de umidade reduzida, saindo menos úmido. Em seguida, esse ar é umidificado através de

resfriadores evaporativos para reduzir sua temperatura e, conseqüentemente, realizar a climatização do ambiente.

A tecnologia dessecante vem sendo aplicada com sucesso para climatização de ambientes em diversos países no mundo, faltando o domínio e difusão dessa tecnologia no Brasil.

Os rotores dessecantes são assim chamados por se constituírem de um núcleo circular composto de milhares de micro canais impregnados com material dessecante. Estes rotores podem adsorver vapor de água continuamente, uma vez que possuem uma ou mais secções destinadas à adsorção do vapor de água e uma destinada à regeneração do material dessecante, tornando o processo de desidratação contínuo.

O sistema de condicionamento de ar dessecante apresenta um Coeficiente de Performance (COP), típico de sistemas não convencionais de climatização e varia em torno de 0,7. Em condições de clima seco e quente, pode atingir 1,0. Os sistemas de refrigeração convencionais por compressão de vapor têm COP variando entre 3 e 4, contudo o sistema dessecante pode trabalhar em circuito aberto – ou seja, com renovação total do ar do ambiente climatizado –, usar energia solar para ajudar na regeneração do rotor e promover condições de conforto térmico humano muito mais apropriadas que os sistemas por compressão de vapor.

O fato é que o sistema dessecante tem sua eficiência diretamente ligada ao desempenho do rotor dessecante e quando se usa energia elétrica ou a queima de um combustível para sua regeneração, o custo de operação é alto.

Nesta pesquisa foi realizada a comparação do desempenho do rotor dessecante, funcionando sobre as condições climáticas de João Pessoa, que tem clima quente e úmido, com uma simulação numérica, a fim de verificar a convergência de resultados e diminuir ou eliminar o número de experimentos do sistema de refrigeração dessecante, uma vez que a experimentação é cara, assim como a simulação de diversas condições climáticas, o que pode definir se a montagem de tal sistema é viável ou não para certa condição de trabalho.

1.2 Revisão bibliográfica

Em relação aos sistemas adsorventes evaporativos empregados para condicionamento de ar:

² Dados estão disponíveis gratuitamente no endereço eletrônico (<http://www.airmetar.com.br/>).

³ Maiores detalhes sobre a escala Beaufort podem ser obtidos na página eletrônica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) através de (<http://www1.cptec.inpe.br/buscasite.shtml#escala%20beaufort>), consultado em 10/12/2015.

Jin et al. (1998) montaram um sistema típico, operando em modo de ventilação com um rotor dessecante, um trocador de calor e dois resfriadores evaporativos. O rotor dessecante utilizado apresentava relação entre as seções de regeneração e processo de 1:1 e 1,22 m de diâmetro, usando água quente circulando em um trocador de calor, para realizar a regeneração do material dessecante do rotor. A temperatura de regeneração foi de 80°C, a velocidade do ar de processo 2 m/s, a capacidade de resfriamento foi de 20 kW e o COP alcançado sob esta condição foi de 0,57.

Kodama et al. (2003) propuseram e investigaram, experimentalmente, dois novos sistemas de resfriamento dessecante para climas úmidos. No primeiro sistema testado, utilizaram ciclo de quatro rotores com duplo estágio de desumidificação. Eles obtiveram um COP de 0,30 para condições de umidade absoluta ambiente até 20g/kg, mas com alto custo inicial. No segundo sistema testado, utilizaram três rotores: 1 rotor regenerativo, 1 rotor dessecante e 1 rotor entálpico. Nesse sistema, eles obtiveram um discreto melhoramento no COP para 0,33, com custo inferior.

Ruivo, Figueiredo e Costa (2004) obtiveram a resposta dinâmica de um sistema dessecante, partindo de certa condição inicial até atingir o regime permanente. Utilizaram um modelo de equilíbrio instantâneo na modelagem do rotor dessecante, faltando-lhes resultados experimentais para melhoramento e validação do modelo empregado.

Heidarinejad e Pasharshahi (2011) estudaram o potencial do uso do sistema adsorativo evaporativo para várias cidades do Irã, por meio de um modelo híbrido, obtendo resultados numéricos com dados experimentais. Eles concluíram que os sistemas dessecantes são mais eficientes que os resfriadores evaporativos diretos e indiretos em regiões de clima quente e úmido.

Uçkan et al. (2013) estudaram uma nova configuração do sistema de resfriamento evaporativo dessecante para condicionamento de ar. Os experimentos foram realizados para investigar o desempenho total do sistema e dos componentes usados durante o verão em um clima quente e úmido. Foram calculados a capacidade de refrigeração, o coeficiente de desempenho (COP) e o consumo de energia do sistema. Os resultados mostram que a eficácia para os permutadores de calor e resfriadores evaporativos são muito elevados, para diferentes condições de ar

exterior. As condições do ar interior com o uso do sistema dessecante ficaram no intervalo de zona de conforto térmico definido pela American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).

No Brasil, os trabalhos que utilizam a tecnologia dessecante envolvendo a refrigeração adsorativa, o resfriamento evaporativo e os sistemas de condicionamento de ar podem ser avaliados em:

Santos (2005) estudou a utilização de insumos alternativos em um sistema de condicionamento de ar ecoeficiente, composto por um sistema evaporativo-adsorativo associado a um sistema de aproveitamento de água pluvial e do calor residual de processo.

Medeiros (2007) investigou a modelagem e simulação numérica de sistemas de condicionamento de ar dessecante, operando em ciclo aberto, compostos de rotores adsorativos, rotores regenerativos, umidificadores e aquecedores para regeneração do dessecante, e desenvolveu um modelo matemático que levou em consideração a resistência à difusão de massa na matriz dessecante para os rotores adsorativos. Baseado nas diversas simulações, determinou os parâmetros importantes na caracterização e otimização de rotores dessecantes, finalizando com a simulação transiente de um sistema dessecante com dois rotores dessecantes, com o objetivo de prever o desempenho do sistema.

Silva (2010) montou um protótipo em escala industrial de um sistema de refrigeração dessecante para condicionamento de ar, utilizando dois rotores dessecantes, dois trocadores de calor rotativos, três resfriadores evaporativos, dois queimadores a gás natural, uma bomba d'água de alta pressão e cinco ventiladores centrífugos. Foi analisado o comportamento do sistema sobre as condições climáticas do clima quente e úmido e também comparado os resultados com os de outros trabalhos experimentais e numéricos. Os resultados obtidos demonstram que, mesmo operando em condições climáticas adversas, o sistema pode atingir desempenho semelhante ao da grande maioria dos sistemas de condicionamento de ar usando rotores dessecantes e que as condições de conforto térmico podem ser alcançadas nas condições do clima de João Pessoa no verão.

Em relação aos rotores dessecantes:

Zheng e Worek (1993) propuseram uma solução para os processos combinados de transferência de calor e massa que ocorrem em um desumidificador com dessecante sólido, usando diferenças finitas.

Neste estudo, concluíram que existe uma rotação ótima de operação do rotor dessecante e que, se esta não for otimizada, leva a uma diminuição da sua performance.

Simonson (1998) desenvolveu e validou um modelo matemático de equilíbrio instantâneo, unidimensional e transiente, envolvendo as transferências de calor e massa na corrente fluida e na matriz dessecante, empregado em rotores entálpicos. Os resultados obtidos foram validados com dados experimentais, e outros testes foram realizados, extrapolando as condições de operação. Também desenvolveu correlações e grupos adimensionais a partir dos princípios físicos e, por fim, estudou condições de condensação e de congelamento.

Zhang e Niu (2002) testaram o desempenho dos rotores dessecantes ativos e passivos. Além de fazerem uma comparação entre esses dois tipos de rotores. Utilizaram um modelo bidimensional transiente, resolvido numericamente via método ADI. Foram investigados os seguintes parâmetros: velocidade de rotação, NTU e área específica. Finalmente, os ciclos de adsorção e dessorção foram plotados em cartas psicrométricas, para mostrar as diferenças observadas na transferência de calor e massa para processo de desumidificação e processo de recuperação entálpica.

Sphaier e Worek (2006) compararam dois modelos matemáticos dimensionais aplicados a rotores adsorptivos e descobriram que um modelo 1D pode ser utilizado em rotores dessecantes, ao passo que foi necessário um modelo 2D para rotores entálpicos.

Ruivo, Costa e Figueiredo (2006) descreveram uma solução transitória unidimensional numérica das equações de conservação de calor, vapor de água e água adsorvida no interior do meio poroso. Eles descobriram que a difusão superficial era o mecanismo mais importante de transporte de água dentro do meio poroso.

Antonellis, Joppolo e Molinaroli (2010) desenvolveram um modelo transiente unidimensional com resistência à difusão de massa no ar para rotores dessecantes. Esse modelo foi usado para otimizar a influência das condições de trabalho e a velocidade de rotação do rotor dessecante no desempenho do equipamento.

Ge et al. (2008) desenvolveram um modelo transiente unidimensional para prever o desempenho de um rotor dessecante, considerando a resistência à difusão de massa no ar e no dessecante. O modelo

para o rotor dessecante teve um melhor desempenho em clima com temperaturas moderadas ou em clima com alta taxa de umidade.

Lee e Kim (2014) estudaram um modelo integral simples para rotor dessecante. As equações governantes foram simplificadas para um conjunto de equações diferenciais ordinárias lineares, e uma solução analítica foi obtida em comparação com o modelo numérico, com o erro relativo menor de 12% e com dados experimentais (cerca de 10%). O modelo analítico é capaz de descrever um rotor dessecante simétrico de forma realista.

2 Materiais e métodos

2.1 Sistema de condicionamento dessecante

Atualmente, a tecnologia dessecante é utilizada também para controle rigoroso da umidade em ambientes climatizados. As vantagens da desumidificação dessecante são: aumenta o conforto, pois o controle de umidade é independente do controle de temperatura; custo operacional menor em relação ao sistema convencional; consumo elétrico menor, pois utiliza fontes alternativas no processo de regeneração do dessecante; sistemas de dutos secos evitando a proliferação de fungos e bactérias; utilização de fluidos de trabalhos não poluentes, melhora a qualidade do ar interior; e reduz a manutenção da edificação ocasionada pela agressão de níveis altos de umidade, diminuindo a corrosão e o mofo.

A desumidificação dessecante é aplicada em:

A desumidificação dessecante é aplicada em: a) supermercados, uma vez que poupa energia reduzindo uso de compressores, elimina a condensação e aumenta o conforto dos clientes nos corredores com balcões de produtos congelados; b) câmaras frigoríficas, visto que poupa energia por meio da redução da carga latente e elimina a flutuação de temperatura e o risco de acidente no ambiente de trabalho devido ao chão liso e gelado; c) blocos cirúrgicos em hospitais, tendo em vista que elimina a transpiração dos cirurgiões, a condensação no ambiente e a proliferação de fungos nos dutos; d) cinemas, por aumentar o conforto dos clientes, permitir o aumento da taxa de ventilação e aumentar a vida útil de assentos e tapetes que são estragados pela presença de níveis altos de umidade; e) escolas, pela redução do custo de energia e dos riscos de saúde associados com

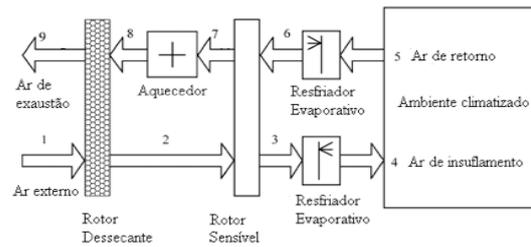
agentes infecciosos aerotransportados e pela diminuição dos níveis de CO₂ em recintos fechados; f) restaurantes, uma vez que aumenta o conforto dos clientes, permite o aumento da taxa de ventilação e diminui o consumo de energia; e g) hotéis, visto que aumenta o conforto dos clientes, permite o aumento da taxa de ventilação e aumenta a vida útil de papéis de parede, carpetes e tapetes, que são estragados pela presença de níveis altos de umidade. Os sistemas de desumidificação por adsorção são aplicados ainda em número muito reduzido, embora se tenha registrado um forte crescimento nos últimos tempos.

Os sistemas de condicionamento de ar dessecante trabalham geralmente em ciclo aberto e são compostos, basicamente, de rotores dessecantes, rotores regenerativos, umidificadores e aquecedores para regeneração do dessecante. Dependendo das condições climáticas da região serem severas ou não (excessiva umidade), muitas variações de montagem e quantidade de rotores serão necessárias, nas quais os rotores regenerativos são trocadores de calor, tipo ar-ar, semelhante aos rotores dessecantes, mas diferem na composição da matriz. A matriz regenerativa não é impregnada com material dessecante, apenas de um substrato metálico e/ou cerâmico. Portanto, não há transferência de massa; os umidificadores são resfriadores de temperatura da corrente de ar utilizando a evaporação da água; os aquecedores são trocadores de calor que utilizam uma fonte quente externa para aquecer a corrente de ar a ser utilizada no processo de regeneração dos rotores dessecantes.

A utilização de rotores dessecantes no condicionamento de ar tem sido estudada por alguns pesquisadores como Ruivo (2005) e Kodama et al (2005). Para viabilizar a produção do efeito de refrigeração, o rotor dessecante deve ser acoplado a um trocador de calor e a um resfriador evaporativo. Uma montagem típica mínima para um conjunto de rotores e resfriador evaporativo, utilizado para condicionamento de ar, é ilustrada na Figura 1.

O processo de condicionamento do ar usando o sistema de rotores dessecante e resfriador evaporativo pode ser explicado seguindo as alterações promovidas nas propriedades do ar em cada ponto indicado na Figura 1.

Figura 1 – Sistema de refrigeração dessecante



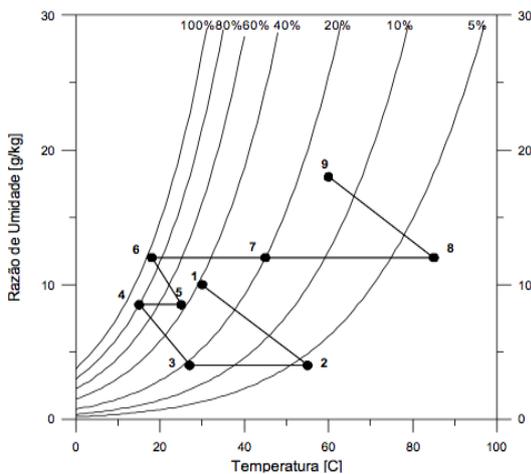
Fonte: Medeiros (2007).

No ponto 1, o ar úmido é captado da atmosfera e a temperatura ambiente, após passar pelo rotor dessecante trocando calor e massa, atinge o ponto 2 com umidade inferior e temperatura superior à do ponto 1. A temperatura está mais elevada do que na entrada devido a dois fatores: primeiro, o processo de adsorção é exotérmico; segundo, o fluxo de ar de processo recebe calor do rotor dessecante, isto é, quando o rotor gira, o material dessecante passa pela seção de reativação, absorve calor do fluxo de ar de regeneração e naturalmente se aquece, transferindo calor para o fluxo de ar de processo. Seguindo o fluxo, o ar entra no rotor sensível onde troca apenas calor, diminuindo sua temperatura, mas esta ainda é superior à temperatura ambiente. No ponto 3, o ar de processo está com baixa umidade e com temperatura próxima à temperatura do ar usado na seção de resfriamento do rotor sensível. Seguindo para o resfriador evaporativo, o ar estará em uma condição propícia a absorver vapor d'água, que é fornecida por meio de borrifamento. O ar ao absorver a água irá ceder calor sensível para que a água mude de fase e evapore, ou seja, absorva calor latente. Como só há troca de calor entre o ar e a água, o processo pode ser considerado adiabático e a entalpia total é constante. Assim, a temperatura do ar diminui e este é conduzido ao ambiente a ser condicionado.

A eficiência desse sistema depende fortemente das alterações nas propriedades do ar dentro do resfriador evaporativo. É desejado que a saturação seja atingida neste instante, mas que a razão de umidade seja inferior à razão de umidade do ambiente a ser condicionado. No ponto 4, o ar deverá estar saturado na temperatura de conforto térmico. Após trocar calor e massa com o ambiente condicionado, dada a carga térmica e diferença de umidade, o ar será succionado e forçado a passar pelo ponto 5, entrada

de um resfriador evaporativo, doravante este fluxo de ar é chamado de ar de retorno. Espera-se que, ao trocar calor e massa com o ambiente condicionado, o ar mude suas propriedades, mas não esteja na condição de saturação, podendo absorver uma pequena quantidade de vapor d'água que será responsável por um pequeno abaixamento em sua temperatura, o que deve ocorrer no ponto 6; assim, este poderá melhorar a troca de calor no rotor sensível. Ao passar pelo ponto 7, a condição do ar será de temperatura alta com razão de umidade alta. O aumento de temperatura obtido no rotor sensível é responsável por uma diminuição no consumo de energia no aquecedor. No ponto 8, o ar aquecido à temperatura de 120°C e baixa umidade relativa proporcionará as alterações no leito poroso do dessecante e o reativará para que siga realizando o processo de adsorção e viabilizando o sistema de condicionamento de ar contínuo. No ponto 9, o ar de retorno alcança o final do sistema, sendo lançado de volta à atmosfera com alta razão de umidade e temperatura próxima à da atmosfera. Na Figura 2, o processo termodinâmico sofrido pelo ar de processo dos pontos 1 ao 9 pode ser visualizado na carta psicrométrica.

Figura 2 – Sistema de condicionamento de ar dessecante usando dois rotores



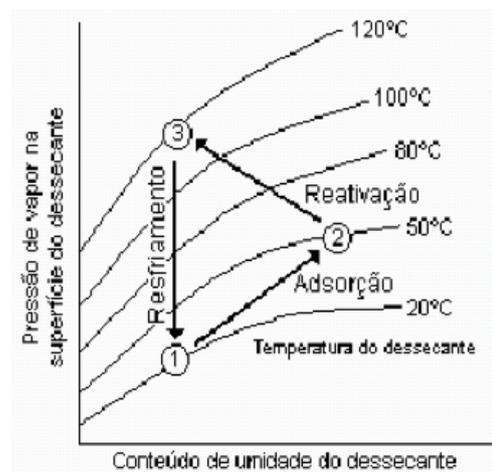
Fonte: Medeiros (2007).

2.2 Rotor dessecante

O rotor dessecante do tipo rotativo, cuja matriz sólida porosa é constituída de vários canais, é o principal componente do sistema de resfriamento dessecante; envolve o fenômeno de adsorção. Para melhor entendimento, descreve-se a seguir o ciclo dessecante ilustrado na Figura 3.

Inicialmente, o dessecante está resfriado, seco e há baixa pressão de vapor em sua superfície. No estado 1, ele pode atrair umidade do ar, ficando úmido e aumentando sua pressão de vapor até atingir a pressão de vapor do ar. Não podendo reter mais umidade do ar, pois neste momento não existe diferença de pressão entre o dessecante e o vapor no ar (estado 2). A seguir, o dessecante é aquecido por uma nova corrente de ar (regeneração). Tal corrente deverá ter baixo teor de umidade e estar aquecida. Ao passar no dessecante, este a aquecerá sob pressão de vapor elevada, maior do que a corrente de ar, possibilitando a liberação de vapor de água do dessecante para o ar até equilibrar a diferença de pressão entre eles. No estado 3, o dessecante estará seco, mas ainda quente, impossibilitando a coleta de umidade. Para restabelecer sua condição inicial de baixa pressão de vapor, o dessecante deve ser resfriado para poder novamente coletar a umidade.

Figura 3 – Ciclo dessecante



Camargo (2003).

Os rotores dessecantes são trocadores rotativos de calor e massa, tipo ar-ar, impregnados com material dessecante e trabalham com uma velocidade de rotação da ordem de algumas rotações por hora. Neste tipo de rotor, a velocidade de rotação é relativamente baixa para permitir a desumidificação do ar úmido, sendo a matriz axialmente atravessada, de forma simultânea, por dois escoamentos de ar de sentidos opostos e o meio poroso dessecante ciclicamente submetido aos processos de adsorção e de dessorção.

O rotor dessecante possui duas zonas que envolvem os processos de adsorção e dessorção. A

relação entre as áreas de dessorção e adsorção pode ser balanceada (1:1) ou desbalanceada (1:3).

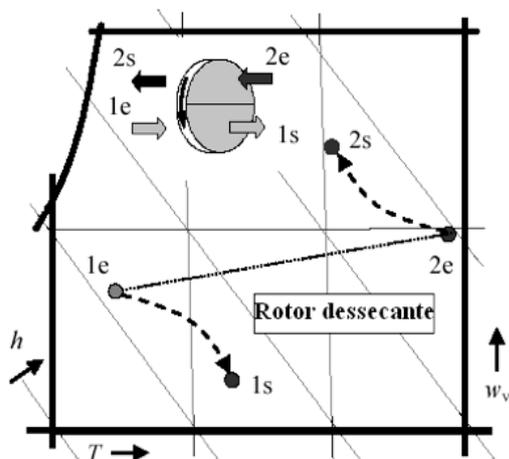
Na seção de dessorção, ocorre justamente a abertura dos poros para que o vapor de água seja arrastado pelo fluxo de ar de reativação. Para isso ocorrer, é necessário o aquecimento do ar através de uma fonte de calor externa, seja por meio de queima de um combustível ou por meio de um fluido aquecido (água, vapor ou outro fluido térmico).

Nos rotores dessecantes, o escoamento do ar ambiente é desumidificado e aquecido, o escoamento de exaustão é umidificado e resfriado, e a matriz porosa é o meio condutor para promover as transferências de calor e massa.

A evolução típica de um rotor dessecante num diagrama psicrométrico está esquematizada na Figura 4, para o caso mais comum de um rotor com zonas de adsorção e dessorção iguais.

Na Figura 4, observa-se que a entrada da seção de adsorção representa o ar externo submetido à temperatura ambiente e úmido no ponto 1e, e a entrada da seção de dessorção representa o ar de reativação submetido à temperatura elevada e úmida no ponto 2e, enquanto os pontos 1s e 2s representam os estados de saída para ambos os processos envolvidos. Ao ser utilizado um rotor dessecante entre tais escoamentos; o ar externo após o processo de adsorção sairá quase seco, porém aquecido devido ao calor de sorção e a troca térmica. Posteriormente, o rotor transferirá calor e umidade para matriz porosa submetida agora na seção de regeneração, possibilitando a abertura dos poros e o arrasto de vapor de água para fora do rotor. Em seguida, o rotor passará novamente para outro ciclo de adsorção e a matriz dessecante estará praticamente seca para possível

Figura 4 – Evolução típica de um rotor dessecante



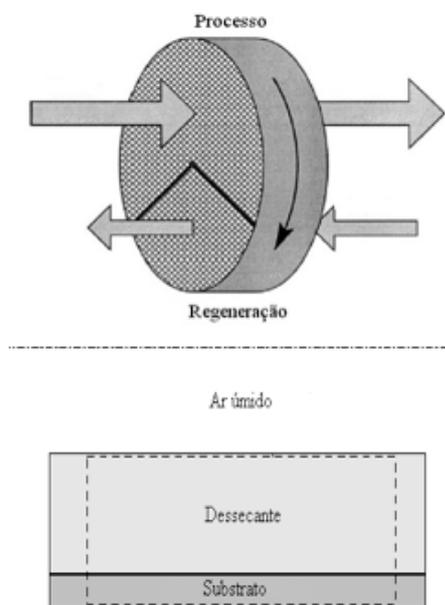
Fonte: Ruivo (2005).

desumidificação da corrente de ar úmido, evoluindo, assim, entre vários ciclos de adsorção/dessorção até atingir a condição de regime permanente.

2.3 Modelagem matemática

Este trabalho investiga os fenômenos que ocorrem nos rotores dessecantes em regime transiente empregando o modelo de equilíbrio instantâneo. Uma configuração típica de um rotor dessecante e um dos canais são mostrados na Fig. 5. O rotor cilíndrico é constituído de uma matriz porosa composta por substrato e material dessecante, formando uma rede de minúsculos canais por onde passa o fluxo de ar úmido nas seções de adsorção e dessorção. Os canais no rotor apresentam formato sinusoidal. As hipóteses adotadas foram: modelo unidimensional no ar úmido e na matriz dessecante; convecção forçada dominante; escoamento laminar e totalmente desenvolvido; fluido incompressível; regime transiente; ausência de gradientes na direção radial; condução de calor no substrato; canais paralelos, idênticos, rígidos, impermeáveis e adiabáticos; as propriedades da matriz dessecante são constantes e as propriedades do ar nas entradas das seções de adsorção e dessorção são uniformes; não há mistura entre adsorção/dessorção; equilíbrio instantâneo e não foram considerados os efeitos de histerese de adsorção, radiação térmica, reação química, vazamentos, condução de calor axial e difusão de massa no fluido.

Figura 5 – Representação esquemática do rotor e de um canal na matriz dessecante



Fonte: Medeiros (2007).

A formulação do problema de transferência de calor e massa em rotores adsorptivos, baseado nas hipóteses relatadas acima, são as seguintes (SIMONSON, 1998):

Equação da conservação da energia para o ar úmido:

$$(\rho_p A)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} + U(\rho_p A)_g \frac{\partial T_g}{\partial x} - m' h_{ad} \eta + h \frac{A_s}{L} (T_g - T_m) = 0 \quad (1)$$

Equação da conservação da energia para matriz dessecante:

$$(\rho_p A)_m \frac{\partial T_m}{\partial t} - m' h_{ad} (1 - \eta) - m' c_p (T_g - T_m) - h \frac{A_s}{L} (T_g - T_m) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{al} A_{al} \frac{\partial T_m}{\partial x} \right) \quad (2)$$

Nas Equações (1) e (2), η representa a fração da energia de mudança de fase que ocorre na interface entre o ar e o dessecante e é transferida para o ar; T_g e T_m são as temperaturas do ar úmido e da matriz dessecante; U é a velocidade da corrente fluida; t é o tempo, x é a coordenada axial, L é comprimento do rotor, h é o coeficiente de transferência de calor, h_{ad} é o calor de adsorção; ρ é a densidade, c_p é o calor específico, A é a área da seção transversal e A_s é a área superficial de um canal; (\cdot) é a taxa de massa adsorvida por unidade de comprimento. Nas equações, os subscritos "g" e "m" são, respectivamente, gás (ar úmido) e matriz (substrato + dessecante).

O ar úmido é composto de ar seco mais vapor de água, possibilitando utilizar uma equação para cada componente da mistura.

Equação de conservação da massa para o vapor d'água:

$$A_g \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_v U A_g) + m' = 0 \quad (3)$$

Equação de conservação da massa para o ar seco:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_a U) = 0 \quad (4)$$

Equação de conservação da massa para a matriz dessecante:

$$m' = \rho_{d,seco} A_d \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5)$$

em que u é a fração mássica de vapor d'água contida no dessecante e A_d é a área transversal do dessecante em um canal.

Durante a adsorção e a dessorção, (\cdot) pode ser calculada de forma mais simples,

$$m' = h_m \frac{A_s}{L} (\rho_v - \rho_{v,m}) \quad (6)$$

Por meio da isoterma de adsorção de Langmuir (u), pode-se determinar a fração mássica de vapor d'água presente no dessecante ($\rho_{v,m}$).

$$u = \frac{f u_m}{1 - C + C/\phi} \quad (7)$$

A densidade na superfície da matriz porosa utilizada por Simonson op. cit. foi determinada da seguinte maneira:

$$\rho_{v,m} = \frac{P_{v,sat}(T_m)}{R_v T_m} \frac{C}{\left(\frac{f u_m}{u} - 1 + C \right)} \quad (8)$$

em que ρ_v , $\rho_{v,m}$ e ρ_a são as densidades do vapor d'água, vapor d'água na superfície da matriz e do ar seco; h_m é o coeficiente de transferência de massa, h_{ad} é o calor de adsorção; u_m é fração máxima adsorvida, C é a constante que determina a forma da isoterma de adsorção, f é fração de dessecante no rotor e ϕ é a umidade relativa do ar úmido. Nas equações, os subscritos "a", "al", "d", "v" e "w" são, respectivamente, ar seco, alumínio, dessecante, vapor e água na fase líquida.

Com a adição de algumas relações fundamentais termodinâmicas, psicrométricas e geométricas descritas em Simonson op. cit., é possível completar a formulação do problema:

$$P_g = P_a + P_v; P_a = \rho_a R_a T_a; P_v = \rho_v R_v T_v \quad (9)$$

$$\rho_g = \rho_a + \rho_v; \rho_d = \rho_{d,seco} (u + 1); \rho_m = \sigma_d \rho_d + \sigma_{al} \rho_{al} \quad (10)$$

$$\sigma_d \rho_d + \sigma_{al} \rho_{al}$$

$$h_{fg} = 2500800 - 2307(T - 273,15) \quad (11)$$

$$h_{ad} = h^* h_{fg}^*, h^* = 1 + 0,2843 \exp(-10,28u) \quad (12)$$

$$P_{v,sat} = \exp \left(\frac{c_8}{T} + c_9 + c_{10} T + c_{11} T^2 + c_{12} T^3 + c_{13} \ln(T) \right); \quad (13)$$

273 < T < 473

As constantes da Eq. (11) são: C8=5800,2206, C9=1,3914993, C10=-4,8640239E-2, C11=4,1764768E-5, C12=-1,4452093E-8 e C13=6,5459673 (SIMONSON, 1998).

$$c_{p_g} = \frac{\rho_a c_{p_a} + \rho_v c_{p_v}}{\rho_g}; c_{p_d} = \frac{\rho_{d,seco}(uc_{p_w} + c_{p_{d,seco}})}{\rho_d};$$

$$c_{p_m} = \frac{\sigma_d \rho_d c_{p_d} + \sigma_{al} \rho_{al} c_{p_{al}}}{\rho_m} \quad (14)$$

$$\sigma_d + \sigma_{al} = 1; \quad \sigma_d = \frac{A_d}{A_m}; \quad \sigma_{al} = \frac{A_{al}}{A_m} \quad (15)$$

$$A_d = t_d p; A_{al} = t_{al} p; A_m = A_{al} + A_d; A_g = 2ab; \quad (16)$$

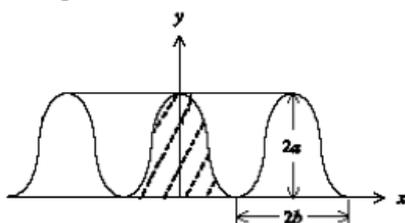
em que P é a pressão, R é a constante específica do gás, σ é a fração de área, td e tal são as espessuras do dessecante e do substrato de alumínio; a e b são as dimensões características de altura e comprimento do canal, respectivamente.

A geometria do canal pode ser aproximada por meio da curva do seno, como ilustrado na Figura 6. A partir do contorno da superfície superior, expresso por $y = a(1 + \cos(\pi x/b))$, sobre uma superfície plana, determina-se o perímetro p, Eq. (17): (ZHANG; DAÍ; WANG, 2003).

$$p \approx 2b + 2\sqrt{b^2 + (a\pi)^2} \frac{3 + \left(\frac{2b}{a\pi}\right)^2}{4 + \left(\frac{2b}{a\pi}\right)^2} \quad (17)$$

A resolução do sistema de equações requer a especificação das condições iniciais e de contorno. No rotor dessecante, cada canal está sujeito a um processo cíclico de adsorção/dessorção que pode ser analisado considerando a parede do canal estática e invertendo, alternadamente, o sentido e o estado do ar de entrada. No processo de adsorção, o escoamento do ar úmido na entrada será atribuído e considera-se que a matriz dessecante encontra-se relativamente seca. No processo de dessorção, o escoamento do ar quase seco na entrada será atribuído e a matriz dessecante estará úmida.

Figura 6 – Geometria do canal



Fonte: adaptado de Zhang, Daí e Wang (2003).

As condições iniciais são impostas no problema, atribuindo valores de temperatura e de concentração na matriz dessecante.

$$T_g(0,x) = T_0; T_m(0,x) = T_0; \rho_v(0,x) = \rho_0; u(0,x) = u_0 \quad (18)$$

As condições de contorno requeridas para o problema são as condições de fluxo de ar úmido nas entradas da seção de processo e da seção de exaustão ou regeneração. Considerando, tpr como o tempo de processo, tex o tempo de exaustão ou regeneração, n o número de ciclos; e os subscritos ent e sai significam, respectivamente, entrada e saída do rotor, podem-se escrever as seguintes condições de contorno para o processo e exaustão.

Para o fluxo de ar de processo:

$$\{n(t_{pr} + t_{ex}) \leq t \leq n(t_{pr} + t_{ex}) + t_{pr}\}:$$

$$T_g(t,0) = T_{g,pr,ent}(t); \rho_v(t,0) = \rho_{v,pr,ent}(t); U(t,0) = U_{g,pr,ent}(t) \quad (19)$$

Para o fluxo de ar de regeneração:

$$\{n(t_{pr} + t_{ex}) + t_{pr} \leq t \leq (n+1)(t_{pr} + t_{ex})\}:$$

$$T_g(t,L) = T_{g,pr,sai}(t); \rho_v(t,L) = \rho_{v,pr,sai}(t); U(t,L) = U_{g,pr,sai}(t) \quad (20)$$

As condições de contorno requeridas na matriz dessecante são:

$$\frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial T_m}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \quad (21)$$

2.4 Tratamento numérico

As equações governantes Eqs. (1-5), sujeitas às condições de contorno e iniciais Eqs. (18-21), foram resolvidas numericamente, usando o Método dos Volumes Finitos (MALISKA, 1995) com arranjo desencontrado (HARLOW e WELCK, 1965). A velocidade foi resolvida nas interfaces dos volumes, e as outras variáveis e propriedades necessárias foram resolvidas nos centros dos volumes da malha computacional. Foram empregados os esquemas de interpolação (CDS) na matriz porosa e (UPWIND) na corrente fluida para avaliar as propriedades e seus gradientes nas interfaces dos volumes de controle. Os sistemas lineares oriundos do processo de dis-

cretização foram resolvidos usando o método das sobre-relaxações sucessivas (SOR), exceto na equação evolutiva para energia na matriz dessecante, em que foi utilizado o algoritmo de Thomas (TDMA) para aumentar a velocidade de convergência.

O procedimento adotado para solução do sistema obedeceu aos seguintes passos:

Estimativa de parâmetros e propriedades.

Resolução de equações evolutivas em sequência.

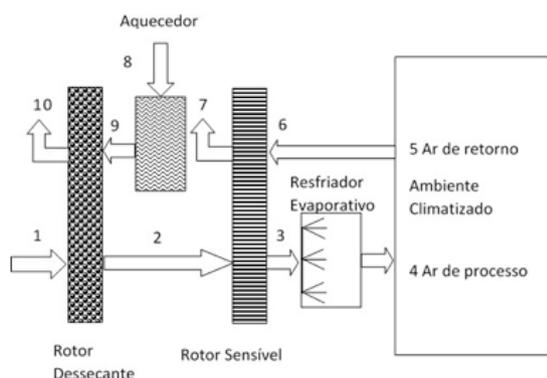
1. Temperatura na matriz dessecante, T_m via Eq. (2); Massa específica do vapor d'água, ρ_v via Eq. (3);
2. Velocidade do ar úmido, U via Eq. (4);
3. Fração mássica de vapor de água no dessecante, u via Eq. (5);
4. Temperatura do ar úmido, T_g via Eq. (1). Atualização de propriedades. Atualização da taxa da massa adsorvida via Eq. (6). Teste da convergência em cada iteração: se não satisfeita, retorna ao passo 2. Teste da solução periódica: se não satisfeita, avança o passo de tempo e retorna ao passo 2.

A resolução numérica do sistema de equações diferenciais parciais não-lineares, compostas pelas equações de conservação de massa e energia, envolvendo o ar úmido e a matriz dessecante, em cada um dos modelos descritos neste capítulo, requer a discretização dos domínios espacial e temporal. As equações foram discretizadas pelo Método de Volumens Finitos com arranjo desencontrado de variáveis.

2.5 Procedimento experimental

A montagem experimental foi composta, basicamente, por: um rotor dessecante, um rotor sensível, um aquecedor, um resfriador evaporativo e equipamentos auxiliares ao seu funcionamento. As medições foram realizadas com termohigrômetros, anemômetros e termopares. Um diagrama da montagem pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 – Montagem experimental



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na entrada do sistema (1) o ar é succionado diretamente da atmosfera para o rotor dessecante. Ao passar por este (2) terá sua razão de umidade reduzida e sua temperatura elevada em um processo de aquecimento desumidificante à entalpia constante. Logo em seguida, é conduzido ao rotor sensível e, ao ultrapassá-lo (3), realiza uma troca de calor, liberando grande parte do calor absorvido no processo de sorção, ponto onde terá baixa razão de umidade e temperatura próxima à temperatura do ar de retorno do ambiente climatizado. Ao entrar no resfriador evaporativo, o ar receberá água pulverizada através de vários bicos e, como esta se encontra próxima à condição de evaporação, absorverá calor latente e mudará de fase, provocando a diminuição da temperatura do ar, em um processo à entalpia constante, pois o resfriador evaporativo é isolado do meio externo e pode ser considerado como adiabático. Ao passar pelo resfriador evaporativo (4), o ar de processo deve ter temperatura baixa e razão de umidade abaixo da umidade do ambiente climatizado. No ambiente condicionado são realizadas trocas de calor e massa, devido às infiltrações externas para o ambiente, aos efeitos da circulação de pessoas neste e da carga térmica instalada. Em (5) deve-se ter o ar, agora chamado de ar de retorno, com temperatura e razão de umidade menores que as do ambiente externo (6) ao passar pelo rotor sensível resfria este e, em seguida, é lançado na atmosfera (7), por meio de um ventilador. Para regeneração do rotor dessecante, em (8), o ar é captado da atmosfera para o aquecedor do rotor dessecante, aquecido por meio da queima direta de Gás Natural Veicular (GNV) em (9) uma mistura de gases com baixa umidade relativa e alta temperatura, fruto das trocas de calor e massa dentro do aquecedor. Na saída do rotor dessecante (10), o ar terá razão de umidade alta e temperatura acima da temperatura do ambiente externo e, assim, é lançado na atmosfera por meio de um ventilador.

As características do rotor dessecante usado neste trabalho são apresentadas na Tabela 1.

Na Figura 8 o rotor dessecante fora da montagem experimental pode ser visto, e na Figura 9 o detalhe dos micro canais do rotor dessecante podem ser observados.

O rotor possui 3/4 de área para retenção de vapor de água e 1/4 para regeneração. A área destinada à reativação é a superior, à esquerda da Figura 8.

Pode ser notado, na Figura 9, o material dessecante e, além disso, que os canais têm perfil sinusoidal.

Tabela 1 – Características do rotor dessecante

Componente/característica	Descrição
Dessecante predominante	Metal Silicato ativo
Substrato	Fibra inorgânica
Densidade (kg/m ³)	270-300
Espessura parede do substrato (mm)	0,22
Resistência à compressão (MPa)	≥ 0,2
Superfície espec. substrato (m ² /m ³)	2600
Quantidade de dessecante	≥ 80 %
Substrato mais superfície endurecida	≤ 20 %
Diâmetro (mm)	550
Largura (mm)	200
Área de reativação/área de adsorção	1:3
Rotação do rotor (RPH)	24
Motor (monofásico, ca)	120 V/ 90 W
Selo de vedação	Borracha
Altura dos canais (mm)	1,8
Passo dos canais (mm)	3,5
Fabricante	ARCTIC INDIA ENGG

Figura 8 – Rotor dessecante



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 9 – Micro canais



Fonte: Elaborada pelo autor.

As características do rotor sensível ou trocador de calor rotativo estão dispostos na Tabela 2.

O rotor sensível pode ser visualizado na Figura 10. Nela, estão evidenciadas as duas regiões de troca de calor: a superior, por onde flui o ar de processo que é usado para climatizar o ambiente desejado, e a inferior, por onde flui o ar de retorno proveniente do ambiente climatizado.

Os demais equipamentos necessários para o funcionamento do protótipo têm as seguintes caracte-

terísticas: queimador atmosférico, com potência de 50 kW; três ventiladores trifásicos, um com 2 cv e outros dois com 1,5 cv cada; reservatórios de gás natural com capacidade de 7,5 m³. Os instrumentos de medição são termo higrômetro, modelo HygroPalm1 do fabricante Rotronic, com capacidade de medição até 200oC; e na medição das velocidades do ar de processo e regeneração foi utilizado um instrumento baseado no método do fio quente da marca OHM, modelo HD 2103.2.

Tabela 2 – Características do rotor sensível

Componente/característica	Descrição
Material	Cobre
Selo de vedação	Borracha
Área processo/resfriamento	1:1
Diâmetro (mm)	700
Espessura (mm)	270
Motor (monofásico, CA)	230 V / 90 W
Tração	Por correia
Rotação do rotor (RPM)	25
Frequência do motor (Hz)	50

Figura 10 – Rotor sensível



Fonte: Elaborada pelo autor.

Até que resultados pudessem ser obtidos, o equipamento foi ajustado, as velocidades de ar de processo e de regeneração foram estabelecidas conforme específica o manual do fabricante as vazões de 1924 m³ e 641 m³, respectivamente, e as temperaturas de regeneração previamente estabelecidas. O equilíbrio de pressões entre as duas correntes de ar também foi verificado, para que não houvesse infiltrações e interferência de uma na outra, uma vez que as correntes de ar de processo e regeneração se dão em contra fluxo no rotor dessecante, da mesma forma que o ar de processo e retorno no rotor dessecante. A regeneração do rotor dessecante foi estabelecida para a temperatura de 120oC. Este valor também foi adotado por ser disponibilizado no manual do fabricante e serve como parâmetro de comparação no presente trabalho. Na Figura 11, parte do experimento pode ser visualizado.

Na Figura 11, da direita para esquerda, tem-se o rotor dessecante com os dutos de ar de processo

entrando na sua seção mais baixa e a saída do ar de regeneração saindo por cima da de processo, isolada com manta papel alumínio. À frente do rotor dessecante, o rotor sensível, a entrada do ar de processo na seção superior isolada e o duto de ar de retorno na seção inferior.

Figura 11 – Montagem experimental



Fonte: Elaborada pelo autor.

3 Resultados

Como mencionado anteriormente, o componente mais importante do sistema de condicionamento de ar dessecante é o rotor dessecante, se o desempenho deste for alto, ou seja, se for realizada uma alta desumidificação do ar, o sistema dessecante terá um bom desempenho, logo, as medições da temperatura e razão de umidade foram realizadas no ar de processo antes e depois do rotor.

As condições de entrada do ar atmosférico no rotor servem como dados de entrada para alimentar o programa computacional que simula o funcionamento do rotor. Os dados de saída do rotor, resultados experimentais, são comparados com os resultados obtidos nas simulações e com os dados fornecidos no manual do fabricante.

Os dados do fabricante não são tomados como definitivos, pois não se sabe sob que condições de teste eles foram obtidos e se, sob as condições climáticas de João Pessoa, o rotor terá o mesmo comportamento dos testes realizados na fábrica.

Na Tabela 3, estão sumarizados os resultados experimentais, numéricos e do fabricante, para diversos valores de temperatura (T) e razão de umidade (w) de entrada no rotor e valores obtidos na saída deste.

É necessário esclarecer que os resultados experimentais foram obtidos em vários dias e em condições climáticas diferentes. De posse dos dados expostos na Tabela 3, foram calculados os erros relativos entre os métodos de obtenção. Estes estão sumarizados na Tabela 4 e são referentes às maiores diferenças entre os resultados obtidos e simulações numéricas e os dados do fabricante. Os sinais positivos e negativos

servem apenas como referência que os valores são maiores ou menores que os experimentais.

Tabela 3 – Comparações dos resultados

Propriedades de entrada		Experimental		Numérico		Fabricante	
T _{ent} [°C]	W _{ent} [g/kg]	T _{saída} [°C]	W _{saída} [g/kg]	T _{saída} [°C]	W _{saída} [g/kg]	T _{saída} [°C]	W _{saída} [g/kg]
30,0	17,0	55,0	10,0	49,2	10,4	52,5	10,0
29,7	18,5	52,0	10,6	49,2	12,0	53,0	11,5
28,0	18,9	52,0	10,6	48,0	11,7	55,0	11,8
28,7	19,9	49,0	13,0	48,6	12,6	52,0	12,6
29,0	17,7	57,0	10,2	48,5	10,8	51,5	10,7
28,7	15,7	51,0	9,1	47,9	9,1	53,0	9,0
28,4	16,6	51,1	10,6	47,9	9,9	52,0	9,8
29,5	18,5	52,0	10,6	49,1	11,9	50,0	11,5
31,3	17,4	51,7	9,3	50,2	10,8	54,0	10,5
29,0	14,2	46,0	8,5	47,7	7,8	52,0	7,9

Tabela 4 – Erros relativos

Variáveis	Experimental - Fabricante	Experimental - Simulação	Simulação - Fabricante
Temperatura	+11,5	-10,7 %	+10,6% -3,7% ----- -12,8 %
Umidade	+7,4 %	-11,6 %	+14,3% -8,0% +4,4 % -0,6 %

4 Conclusões

Os resultados permitem concluir que os dados fornecidos pelo fabricante não correspondem exatamente às condições de funcionamento do rotor sob as condições estabelecidas neste trabalho e no clima de João Pessoa, reafirmando a necessidade de realização de montagem experimental para obtenção de dados experimentais.

O modelo matemático utilizado apresenta uma aproximação com os resultados experimentais, contudo as hipóteses simplificadoras e equacionamento devem ser revistos e mais testes realizados, para que os resultados numéricos possam apresentar valores mais próximos dos resultados experimentais, o que aponta para utilização de um modelo mais robusto para representar os fenômenos de transferência de calor e massa no rotor dessecante.

RESPONSABILIDADE DE AUTORIA

As informações contidas neste artigo são de inteira responsabilidade de seus autores. As opiniões nele emitidas não representam pontos de vista da Instituição e/ou do Conselho Editorial.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio financeiro disponibilizado pelo IFPB para o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANTONELLIS, S. D.; JOPPOLO, C. M.; MOLINAROLI, L. Simulation, performance analysis and optimization of desiccant wheels, **Energy and Buildings**, v. 42, n. 9, p. 1386-1393, set. 2010.
- CAMARGO, J. R. **Sistemas de resfriamento evaporativo e evaporativo-adsortivo aplicados ao condicionamento de ar**. 2003. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da UNESP, Guaratinguetá, São Paulo, 2003.
- FREITAS, E. F. **Construção de uma bancada otimizada para estudo de painéis evaporativos e ensaios de painéis de fibras vegetais**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2007.
- GE, T. S. et al. Experimental investigation on a one-rotor two-stage rotary desiccant cooling system, **Energy**, v. 33, n.11, p. 1807-1815, dec. 2008.
- HARLOW, F. H.; WELCH, J. E. Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface. **Physics of Fluids**, v. 8, n.12, p. 2182-2189, dec. 1965.
- HEIDARINEJAD, G., PASDARSHAHRI H., Potential of a desiccant-evaporative cooling system performance in a multi-climate country. **International Journal of Refrigeration**, v. 34, n. 5, p. 1251-1261, aug. 2011.
- JIN, W. et al. An adsorptive Desiccant Cooling using Honeycomb Rotor Dehumidifier. **Journal of Chemical Engineering of Japan**, v. 31, n. 5, p. 706-713, 1998.
- KODAMA A. et al. Process Configurations and Their Performance Estimations of an Adsorptive Desiccant Cooling Cycle for Use in a Damp Climate. **Journal of Chemical Engineering of Japan**, v. 36, n. 7, p. 819-826, 2003.
- KODAMA, A. et al. Experimental Study on a Process Design for Adsorption Desiccant Cooling Driven with a Low-Temperature Heat, Springer Science, Business Media, Inc. Manufactured in The Netherlands. **Adsorption**, v. 11, p. 631-636, 2005.
- LEE, D. Y.; KIM, D. S. Analytical modeling of a desiccant wheel. **International Journal of Refrigeration**, v. 42, p. 97-111, 2014.
- MALISKA, C. R. **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**, Rio de Janeiro: LTC, 1995.
- MEDEIROS J. M. **Modelagem e Simulação de Sistemas de Condicionamento de Ar com Rotores Dessecantes**. 2007. 162 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, 2007.
- MOREIRA, H. M.; GIOMETTI, A. B. R. Protocolo de quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no mecanismo de desenvolvimento limpo por meio de projetos em energia limpa. **Contexto int.**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 1, p. 9-47, apr. 2008.
- RUIVO, C. R. **Modelação Numérica dos Fenômenos de Transferência de Calor e de Massa em Rodas Higroscópicas**. 2005. 248 f. Tese (Doutorado) – Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal. 2005.
- RUIVO, C. R.; COSTA, J. J.; FIGUEIREDO, A. R. Analysis of simplifying assumptions for the numerical modeling of the heat and mass transfer in a porous desiccant medium, **Numerical Heat Transfer, Part A**, v. 49, p. 851-872, 2006.
- RUIVO, C. R.; FIGUEIREDO, A. R.; COSTA, J. J. Predicted results of the performance of a unizone solid desiccant evaporative cooling. In: CONGRESSO MEDITERRÂNICÓ DE CLIMATIZAÇÃO, 2004, Lisboa, Portugal, **Proceedings...** Lisboa: 2004.
- RUTHVEN, D.M. **Principles of Adsorption Processes**. New York: Wiley Interscience Publicacion, 1984.
- SANTOS, M.A.M. **Análise técnica e econômica para utilização de insumos alternativos em um sistema de resfriamento evaporativo-adsortivo aplicado ao condicionamento de ar**. 2005. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Taubaté, Taubaté, São Paulo, 2005.
- SILVA, M. G. **Estudo Experimental de um Sistema de Condicionamento de Ar com Rotores Dessecantes**. 2010. 156 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, 2010.
- SIMONSON, C. J. **Heat and Moisture Transfer in Energy Wheels**. 236 f. Thesis (Ph.D. in mechanical engineering) – University of Saskatchewan, Canada, 1998.
- 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, p. 223-237, 2006.

UÇKAN I. et al. Experimental investigation of a novel configuration of desiccant based evaporative air conditioning system. **Energy Conversion and Management**, v. 65, p. 606-615, 2013.

ZHANG L. Z.; NIU J. L. Performance comparisons of desiccant wheels for air dehumidification and enthalpy Recovery. **Applied Thermal Engineering**, v. 22, n. 12, p. 1347-1367, 2002.

ZHANG X. J.; DAÍ Y. J.; WANG R. Z. A simulation study of heat and mass transfer in a honeycombed rotary desiccant dehumidifier. **Applied Thermal Engineering**, v. 23, p. 989-1003, 2003.

ZHENG, W.; WOREK, W. M. Numerical simulation of combined heat and mass transfer processes in a rotary dehumidifier. **Numerical Heat Transfer**, v. 23, n. 2, p. 211-232, 1993.