

ESTUDO DA CINÉTICA ADSORTIVA EM UM LEITO DE UM REATOR ADSORTIVO UTILIZANDO O PAR SÍLICA GEL ÁGUA

GUIMARÃES, Gabriel José Costa

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA. gabrieljose.0@outlook.com

MACEDO, João Gabriel Conceição

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA. joao2gabriel22@hotmail.com

MARÇAL, Roberto Caparelli

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA. roberto.marcal@docente.unievangelica.edu.br

COLHERINHAS, Gino Bertolucci

Centro Universitário de Anápolis - UniEVANGÉLICA. gino.colherinhas@docente.unievangelica.edu.br

Resumo

A dessalinização como alternativa para solucionar a escassez de água potável têm induzido a busca por novas tecnologias que consigam conciliar rendimento e baixo consumo de energia. As tecnologias usadas atualmente apresentam um rendimento satisfatório, e em contrapartida um grande consumo de energia e alta emissão de CO₂ equivalente. A dessalinização por adsorção é uma tecnologia emergente, tendo como componente fundamental o reator adsortivo, que tem como objetivo apresentar um rendimento aceitável com baixo consumo energético, utilizando como fonte a energia solar. Além de apresentar um ciclo simples em comparação com as demais tecnologias de dessalinização, possuindo como base de sua construção: evaporador, leito adsortivo e condensador. O processo apresenta uma dessalinização baseada na evaporação de água salgada ou salobra a baixa pressão no evaporador. Com o objetivo de estudar a cinética adsortiva do leito, foi proposto um modelo matemático, cujas equações foram implementadas no software MatLab para obter resultados de D-A, LDF e calor isostérico. Os resultados apresentaram melhor faixa de trabalho nos *inputs* de menor temperatura de banho frio.

Palavras-Chave: MatLab; Reator Adsorativo; Simulação Numérica; Dessalinização.

1. Introdução

Uma das grandes preocupações mundiais é a escassez de água potável disponível para consumo. Sabe-se que 97% da água presente no planeta não é apropriada para consumo humano, sobrando apenas 2-3% de água disponível para tal (RAJ; BAIJU, 2019). A situação de distribuição de recursos hídricos no Brasil não se afasta desta problemática, diversas regiões apresentam uma grande escassez de água devido a má distribuição e/ou localização geográfica. “Apesar da abundância, os recursos hídricos brasileiros não são inesgotáveis. O acesso à água não é igual para todos. As características geográficas de cada região e as mudanças de vazão dos rios, que ocorrem devido às variações climáticas ao longo do ano, afetam a distribuição” (ÁGUA, 2020).

Dada esta necessidade, novas tecnologias capazes de suprir a demanda de água potável se tornaram uma vertente de pesquisa necessária. O processo de dessalinização consiste em separar o excesso de sal e outros minerais da água marinha ou salobra tornando-a assim própria para o consumo, alguns exemplos destas tecnologias são a osmose reversa e a eletrodialise (RAJ; BAIJU, 2019). As tecnologias empregadas hoje em dia apresentam grande consumo energético e conseqüentemente alta emissão de CO₂ equivalente, e a necessidade de realizar um tratamento químico na água antes de sua dessalinização, produzindo uma salmoura com dejetos químicos, que quando descartado agride a natureza (NG et al., 2013).

A dessalinização por adsorção é uma tecnologia emergente que possui menor produção de água dessalinizada, porém com custo energético inferior à osmose reversa e a eletrodialise. O processo utiliza como fonte de energia a radiação solar que seria dissipada no meio ambiente para fornecer energia utilizada no ciclo (NG et al., 2013). Outras vantagens do ciclo de dessalinização por adsorção são: produzir água potável e efeito refrigerante; menor custo de manutenção devido a ausência de partes móveis; taxa de incrustação baixa

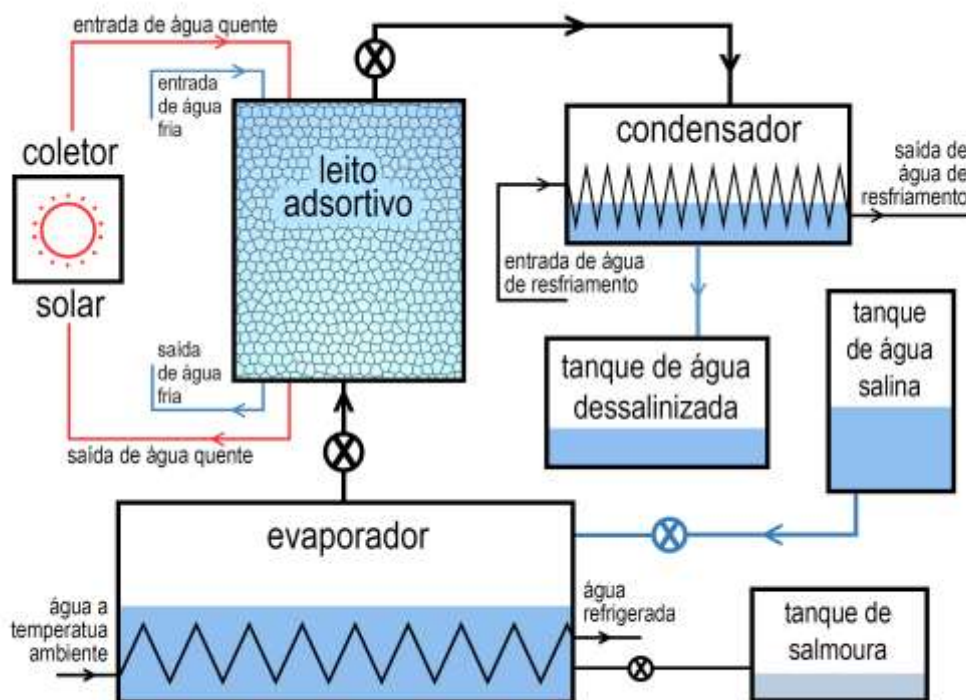
consequente da baixa temperatura de evaporação; ecológico; acionado por fontes de calor de baixa temperatura, redução da taxa de emissão de CO₂ equivalente (WOO et al., 2019).

A adsorção consiste na propriedade de um sólido (adsorvente) atrair moléculas ou fluidos (adsorvato) à sua superfície. Esse processo é explicado pelo autor Vodianitskaia (2016) "A adsorção física se assemelha à condensação, e depende de forças de fraca intensidade, denominadas forças de Van Der Waals, entre o adsorvente e o adsorvato". São adotados pares de adsorvente-adsorvato nos processos adsortivos, nos quais os mais utilizados são: sílica gel e água; zeólita e água; e carvão ativado e álcool (VODIANITSKAIA, 2016).

Para o processo de dessalinização é comum o uso de sílica gel e água como par adsorvente-adsorvato. Existe uma gama de materiais adsorventes como o carvão ativado e os zeólitos, que apresentam temperaturas de regeneração igual ou superior a 100°C, tornando inviável o uso destes materiais no reator adsortivo. O consumo energético nestas ocasiões tornaria inviável o uso da energia solar e em contrapartida, a sílica gel necessita de uma temperatura de regeneração igual ou inferior a 85°C sendo viável seu uso no reator adsortivo (WOO et al., 2019).

O ciclo adsortivo é um processo relativamente simples em comparação aos outros processos, possuindo três componentes básicos: o evaporador, o leito adsortivo (podendo ser mais de um) e o condensador. O ciclo adsortivo (figura 1) produz refrigeração e pode produzir a dessalinização em conjunto (REZK et al., 2019). Neste trabalho será considerado o processo dessalinizador, pontuando as características encontradas em ciclos de adsorção com capacidade para dessalinização.

Figura 1: Diagrama esquemático de um sistema de dessalinização por adsorção



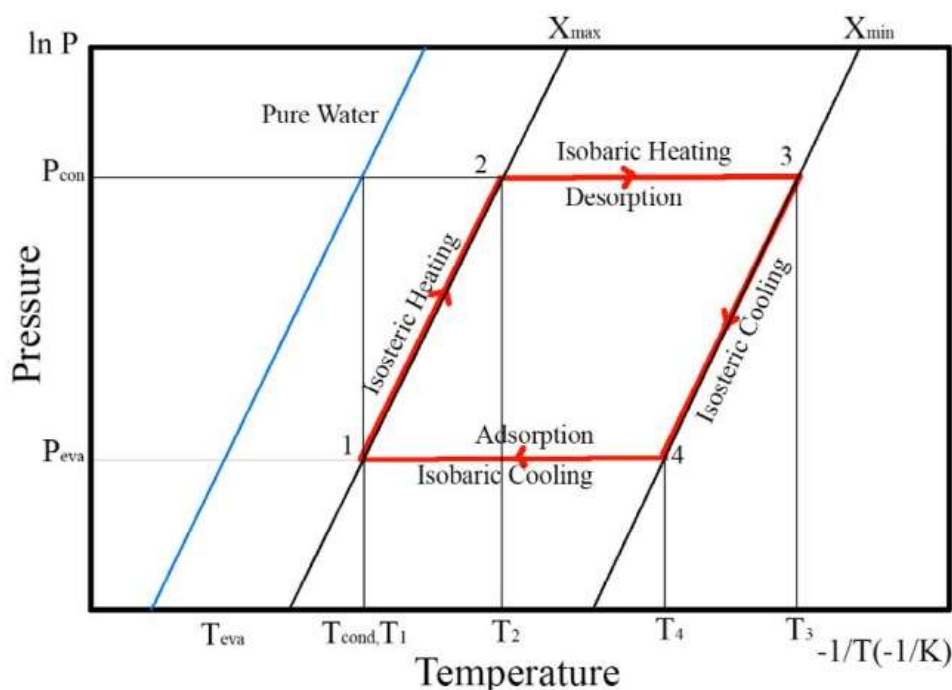
Fonte: Autoral

O evaporador consiste em um recipiente onde é inserido a água salgada ou salobra que será dessalinizada e de uma serpentina interna ao recipiente com fluido (geralmente água) a temperatura ambiente. A pressão no evaporador é reduzida até o ponto no qual a água em dessalinização entra em mudança de estado retirando calor em estado latente do líquido presente na serpentina, resfriando o líquido da serpentina e evaporando a água salgada/ salobra. Durante a evaporação, uma válvula entre o evaporador e o leito adsortivo se abre, permitindo escoamento do vapor de água dessalinizada para o leito (RAJ; BAIJU, 2019).

O leito adsorvivo é onde se encontra a sílica gel responsável pela adsorção e dessorção da água. No primeiro momento, o leito passa por um banho frio, no qual água em temperatura ambiente circula por tubos aletados dentro do leito para ajudar a adsorção do vapor de água na sílica. Após a saturação da sílica, é fechada a passagem entre o evaporador e o leito. Neste segundo momento, acontece o banho quente, no qual uma porção de água aquecida pela radiação solar circula pelos tubos aletados, contribuindo para a regeneração da sílica, também chamada de dessorção (processo onde o vapor de água se “desprende” da superfície da sílica). Este vapor é então escoado para o condensador (ESCOBEDO, 1987).

O condensador possui funcionamento similar ao evaporador, porém, a água passante no interior da serpentina está refrigerada e trabalha retirando calor para o vapor de água dessalinizada condensar. Vale ressaltar que todo o sistema é isolado termicamente (RAJ; BAIJU, 2019).

Figura 2: Ciclo de dessalinização por adsorção



Fonte: (RAJ; BAIJU, 2019)

A análise da capacidade de adsorção do material utilizado no leito adsorvivo pode ser estimada utilizando a equação de Dubinin-Astakhov. Esta equação rege a capacidade de adsorção em materiais porosos (VODIANITSKAIA, 2016). Enquanto que a cinética de adsorção será avaliada pela equação LDF (*Linear Driving Force*), ela rege a cinética de adsorção baseado na saturação, raio médio da sílica gel e do tempo de ciclo (MOHAMMED, R. H. et al, 2018). O processo de dessalinização, está baseado em um ciclo de adsorção térmico com 4 processos termodinâmicos visíveis na figura 2. Esta figura representa as transformações que ocorrem durante todo o processo. Sendo 1-2 o aquecimento isostérico, onde o material poroso será aquecido juntamente com o vapor nele contido, chegando ao ponto de pressão saturada de condensação. No processo 2-3 ocorre um aquecimento isobárico, neste ponto ocorre a dessorção com a saída do vapor do leito para o condensador. No processo 3-4 ocorre um resfriamento isostérico do leito e tanto a pressão quanto a temperatura diminui. No processo 4-1 ocorre um resfriamento isobárico, durante esse processo o leito absorve o vapor que é liberado pelo evaporador (ESCOBEDO, 1987).

Este trabalho se dedica a estudar a cinética adsorviva do par sílica gel-água para encontrar a melhor temperatura de banho frio. Utilizando as equações encontradas na literatura para simular o processo adsorvivo. As equações encontradas foram implementadas no software MatLab utilizando *inputs* baseados na literatura.

2. Metodologia

A metodologia dos estudos conduzidos nesta simulação se baseia nos experimentos realizados pelos autores Ahmed S. Alsaman e Kim Choon Ng. No estudo do autor Alsaman é apresentado um protótipo de um sistema com a utilização de dois leitos adsortivos trabalhando alternadamente, os dados usados para os par sílica gel água foram obtidos através de experimentos realizados pelo próprio autor. O estudo faz um comparativo entre os resultados reais e os resultados teóricos (ALSAMAN et al., 2017). O autor Kim Choon apresenta um protótipo de uma planta adsortiva para o estudo da viabilidade do sistema adsortivo como uma tecnologia de dessalinização. Ambos os autores apresentam estudos comparativos entre o protótipo e a simulação numérica (NG et al., 2013).

O foco deste trabalho está no estudo da cinética adsortiva envolvida no leito de sílica gel, observando seu modelo teórico e analisando os gráficos gerados pela simulação. Em primeira instância foi definido a sílica gel blue como material adsortivo. Os *inputs* usados nas equações foram oriundos das propriedades deste material.

Tabela 1 – Constantes aplicadas no MatLab

Parâmetros	Nomenclaturas	Valores e Unidades
Capacidade máxima de adsorção	Cmax	0,36 Kg/Kg
Constante Universal dos gases	R	0,2871KJ/Kg*K
Relação adsorvente-adsorvato	n	1,68
Energia característica	E	167,74 KJ/Kg
Coefficiente pré exponencial	Dso	2,25*10 ⁻¹⁰ m ² /s
Energia de ativação	Ea	28,685 KJ/Kg
Raio médio da partícula	Rp	1,75*10 ⁻³ m
Calor latente da água	hfg	2260 J/Kg
Coefficiente de dilatação térmica da fase adsorvida		1

Fonte – Autoral

Uma série de considerações foram adotadas para resolução das equações numéricas, sendo elas:

- O leito adsortivo está totalmente isolado e sem troca de calor com o meio externo;
- As propriedades do vapor de água, sílica gel, aletas e paredes são constantes;
- A resistência do fluxo de água através do tubo aletado é desconsiderada;
- A sílica gel é totalmente regenerada ao fim do ciclo.

O conjunto de equações foi implementado no software MatLab para encontrar o melhor ponto de operação do leito. Os valores utilizados estão descritos na tabela 1. O cálculo dos parâmetros de adsorção, usou-se como base a equação de Dubinin-Astakhov (ALSAMAN et al., 2017), citada abaixo:

$$C^* = C_{max} * e^{\left\{-\left[\frac{R*T}{E} \ln\left(\frac{P_{sat}}{P}\right)\right]^n\right\}} \quad (1)$$

A equação 1 apresenta teoricamente o processo de adsorção de vapor de água pela sílica gel em determinada faixa de pressão e temperatura constante. Para a implementação foi necessário determinar temperaturas de entrada da água utilizada para o banho frio, representado por T em K, os valores de Psat e P representam respectivamente a pressão de saturação do vapor de água e a pressão dentro do leito adsortivo ambos em KPa. O C* representa a capacidade de adsorção da sílica gel nas condições impostas (ALSAMAN et al., 2017). As temperaturas utilizadas foram 20°C, 25°C, 30°C, 35°C e 40°C e convertidas para Kelvin na implementação.

Para expressar a adsorção em relação ao tempo foi utilizada a equação de LDF (*Linear Driving Force*), utilizando o raio médio da partícula para estimar a área superficial da sílica gel e derivando a equação em relação ao tempo de ciclo para demonstrar como a adsorção se comporta durante o ciclo. Os valores de C^* são utilizados na equação em seus respectivos valores em função da temperatura (NG et al., 2013).

$$\frac{dC}{dt} = \frac{15D_{so} * \exp\left(-\frac{E_a}{R*T}\right)}{R_p^2} * (C^* - C) \quad (2)$$

Calculados D-A e LDF (equações 1 e 2), os valores obtidos foram implementados para obtenção do calor isostérico liberado na fase de adsorção do vapor de água (ALSAMAN et al., 2017):

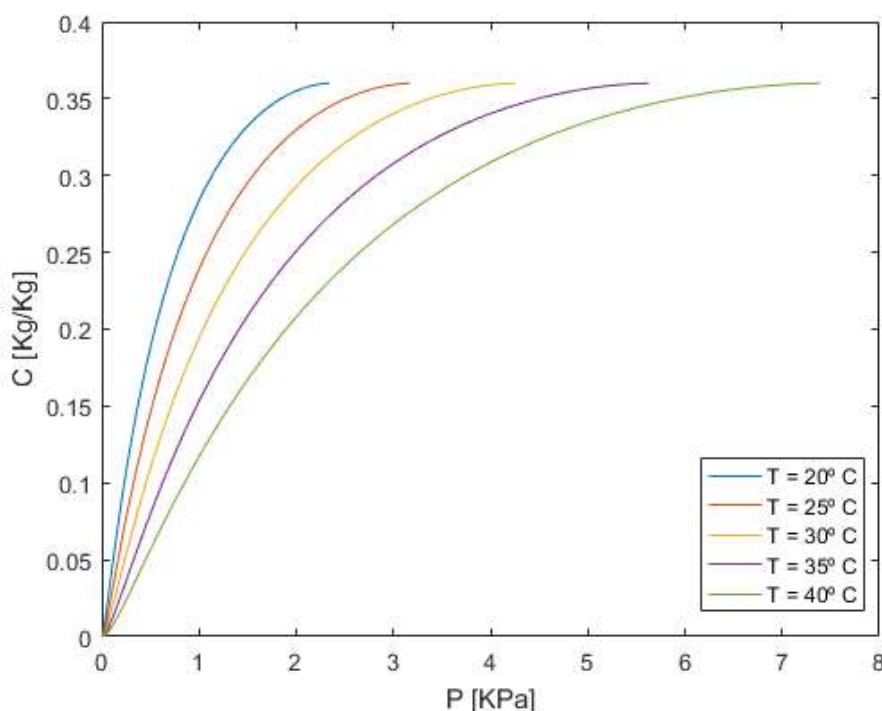
$$H_{st} = h_{fg} + E \left[\ln\left(\frac{C_{max}}{C^*}\right)^{\frac{1}{n}} \right] + \frac{(E * T * \alpha)}{n} * \left[\ln\left(\frac{C_{max}}{C^*}\right)^{\frac{1-n}{n}} \right] \quad (3)$$

O calor isostérico utiliza os resultados obtidos na equação 1, o calor latente da água e o coeficiente de dilatação da sílica gel para determinar a quantidade de calor liberado durante a adsorção. Após implementações, foram obtidos gráficos para análise e discussão da cinética de adsorção do leito.

3. Resultados e discussão

A equação 1 retornou o gráfico apresentado na figura 3, no qual é possível analisar dentre os inputs selecionados, qual a melhor temperatura do banho frio e a pressão para que a sílica gel consiga adsorver a maior quantidade de vapor de água. Este gráfico demonstra que em baixas temperaturas, a sílica consegue adsorver de maneira mais efetiva o vapor de água a uma baixa pressão, portanto, quanto maior for a temperatura do banho frio, menor será a capacidade adsorptiva da sílica gel

Figura 3: Concentração máxima por temperatura



Fonte: Autoral

Os efeitos apresentados na figura 3 ocorrem porque o fenômeno de adsorção é exotérmico. Durante o processo de adsorção há uma liberação de energia que é transferida para o banho frio, e essa transferência de energia para a água de banho frio através do tubo aletado faz com que a sílica gel consiga adsorver uma quantidade maior de vapor por unidade de sílica gel.

A tabela 2 abaixo demonstra o melhor resultado apresentado pela simulação do autor Alsaman e o melhor resultado pela simulação deste trabalho. Ambos os estudos apresentaram melhores valores da equação 1 para temperaturas de banhos frios menores.

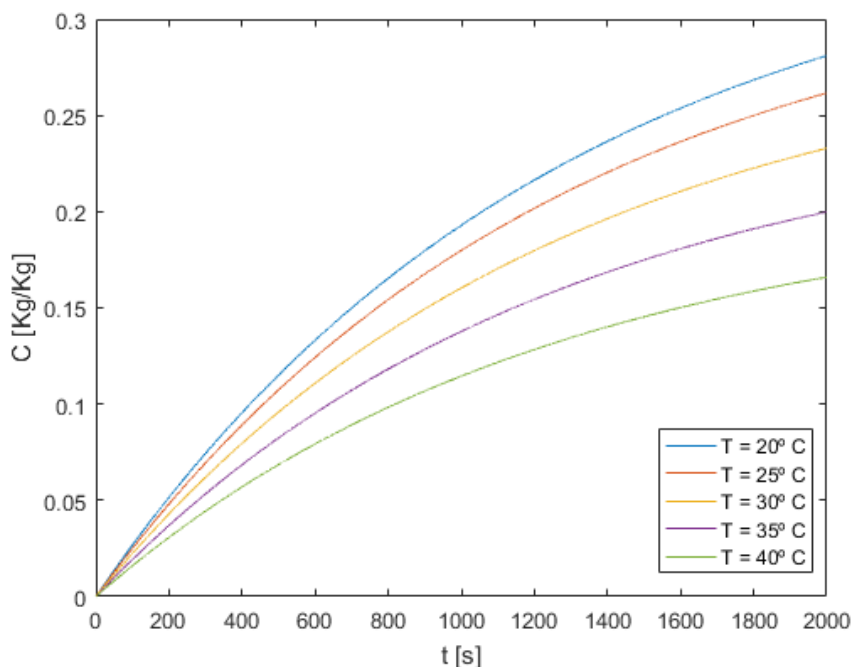
Tabela 2: Resultados apresentados

Referência	Estudo teórico/experimental	Nº de Leitões	Tempo de Ciclo	Temperatura	Concentração C^*
ALSAMAN	teórico/experimental	2	2500	25°C	0.30 Kg/Kg
Autores	teórico	1	2000	20°C	0.35 Kg/Kg

Fonte: Autoral

A figura 4 demonstra a capacidade de adsorção da sílica gel em relação a área superficial e ao tempo de ciclo, utilizando como base a equação 2. Para a implementação da equação 2 foi necessário resolvê-la como uma EDO e utilizar os valores concentração obtidos para cada valor de banho frio obtidos na equação 1.

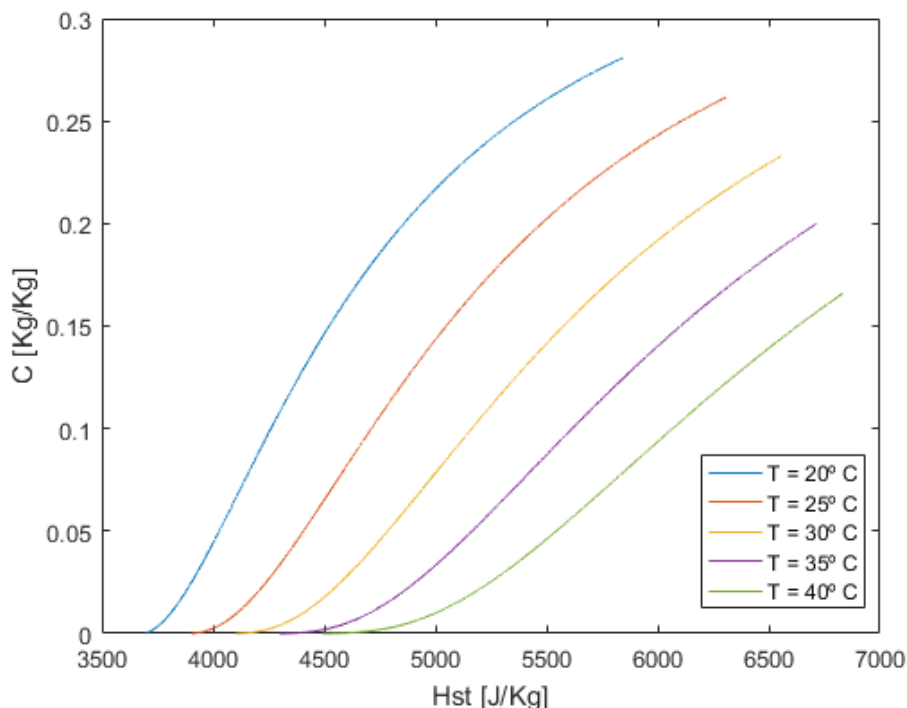
Figura 4: Concentração máxima por tempo de ciclo



Fonte: Autoral

As curvas da figura 4 demonstram que, mesmo em um tempo de ciclo relativamente alto, os ciclos de água fria com temperaturas elevadas não conseguem fornecer uma quantidade de adsorção satisfatória para o processo. Isso pode ser explicado pelo gráfico adquirido após a resolução das equações 3 e 4. Os resultados adquiridos na equação 1 foram aplicados na equação 3, fornecendo o gráfico da figura 5 e demonstrando a quantidade de calor isostérico liberado durante o processo de adsorção.

Figura 5: Liberação de calor isostérico pela concentração de vapor de água na sílica gel



Fonte: Autoral

O gráfico complementa a equação 1, pois demonstra de maneira clara que em temperaturas menores de banho frio a quantidade de energia liberada é menor e a concentração de vapor é maior. O fenômeno ocorre porque os banhos de água fria nas temperaturas de 20°C e 25°C conseguem absorver maiores quantidades de calor liberadas pelo processo de adsorção, resultando uma melhor adsorção pela sílica gel.

4. Conclusão

Após implementação das equações no software, os resultados apresentaram a melhor faixa de temperatura para se trabalhar durante o processo de adsorção do vapor de água, durante o ciclo e para absorver o calor isostérico liberado durante a adsorção, a faixa de temperatura ideal se encontra entre 20 e 25°C. Otimizar essa etapa do ciclo significa aumentar a capacidade de produção de água para uma determinada quantidade de sílica gel presente no leito. Certas localidades não apresentam água à temperatura ambiente com as temperaturas indicadas para o uso no banho frio. Este problema pode ser solucionado utilizando a água refrigerada que é produzida no evaporador. Os autores pretendem em um futuro trabalho, propor novos modelos matemáticos para otimização estimando os parâmetros operacionais ótimos como o banho de água, o banho de água quente, pressão do condensador e pressão do evaporador, maximizando a produção de vapor através do leito adsorvente e minimizando o consumo energético.

5. Referências

- Água. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/agua.html>>. Acesso em: 25 maio. 2020
- ALI, E. S. et al. Weather effect on a solar powered hybrid adsorption desalination-cooling system: A case study of Egypt's climate. [s.l: s.n.]. v. 124
- ALSAMAN, A. et al. Performance evaluation of a solar-driven adsorption desalination-cooling system. *Energy*, v. 128, p. 196-207, 2017.
- ESCOBEDO, J. F. Refrigeração com o Uso de Energia Solar. Instituto de Física e Química de São Carlos, p. 196, 1987.
- MOHAMMED, R. H. et al. Physical properties and adsorption kinetics of silica-gel/water for adsorption chillers. *Applied Thermal Engineering*, Março de 2018.
- NG, K. C. et al. Adsorption desalination: An emerging low-cost thermal desalination method. *Desalination*, v. 308, p. 161–179, 2013.
- RAJ, R.; BAIJU, V. Thermodynamic analysis of a solar powered adsorption cooling and desalination system. *Energy Procedia*, v. 158, p. 885–891, 2019.
- REZK, H. et al. Identifying optimal operating conditions of solar-driven silica gel based adsorption desalination cooling system via modern optimization. *Solar Energy*, v. 181, n. February, p. 475–489, 2019.
- VODIANITSKAIA, Paulo José. Estudo teórico e experimental de um chiller a adsorção para sistemas de ar condicionado solar. 2016. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.
- WOO, S. Y. et al. Silica gel-based adsorption cooling cum desalination system: Focus on brine salinity, operating pressure, and its effect on performance. *Desalination*, v. 467, n. June, p. 136–146, 2019.