



REFRIGERAÇÃO SUSTENTÁVEL: UTILIZAÇÃO DO PROCESSO DE ADSORÇÃO

SUSTAINABLE REFRIGERATION: USE OF ADSORPTION PROCESS

C. T. CAPDEVIELLE¹, I. N. PARDINI¹, K. A. IZUMIDA¹, R. M. V. SILVA¹ e I. C. FRANCO^{1,*}

¹ Centro Universitário FEI, Departamento de Engenharia Química, São Bernardo do Campo-SP, Brasil

*Autor Correspondente: centro Universitário FEI, Departamento de Engenharia Química, Avenida Humberto de Alencar Castelo Branco, 392, 09850-901, São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil. Telefone: +55-11-4353-2915.
e-mail: icfranco@fei.edu.br (I. C. Franco)

ARTICLE INFO

Article history:
Received 2018-01-07
Accepted 2018-02-02
Available online 2018-12-28

palavras-chave

Refrigeração
Adsorção
Sustentabilidade
Energia Solar

keywords

Refrigeration
Adsorption
Sustainability
Solar energy

ABSTRACT

The concern about the environment and energy savings is a recurring issue today. Cooling systems are important in the industrial and home context and both are large energy consumers. Currently, the vast majority of refrigeration systems use non-renewable energy, which has several negative points in its use. Thus, this work consists of the study of adsorption refrigeration in a sustainable way without using electric energy or energy sources harmful to the environment. Using solar energy as a source of heat, instead. The properties and characteristics of some adsorbent pairs were investigated, being the adsorbent the activated carbon and as an adsorbate the anhydrous ethanol. For the validation of concepts, a prototype was constructed where the tests were promoted, serving as the basis for a comparative evaluation, in terms of performance coefficient

RESUMO

A preocupação com o meio ambiente e economia de energia é um assunto recorrente atualmente. Sistemas de refrigeração são importantes tanto no contexto industrial quanto no domiciliar e são grandes consumidores de energia. Atualmente, a grande maioria dos sistemas de refrigeração utiliza energia não renovável, que apresentam diversos pontos negativos em sua utilização. Assim, este trabalho consiste no estudo da refrigeração por adsorção de uma maneira sustentável, ou seja, sem a utilização de energia elétrica ou fontes de energia prejudiciais ao meio ambiente, utilizando energia solar como fonte de calor. Foram realizadas pesquisas das propriedades e características de alguns pares adsorventes, sendo proposto, como adsorvente o carvão ativado e como adsorvato o etanol anidro. Para validação de conceitos, foi construído um protótipo onde os ensaios foram promovidos servindo de base para uma avaliação comparativa, em termos de coeficiente de performance.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente e economia é um assunto atual no mundo. Em 2014, o Brasil foi considerado o oitavo país de maior consumo de energia no mundo e o terceiro nas Américas, atrás somente dos Estados Unidos e Canadá, de acordo com as estatísticas da BP – empresa de energia. (EIA,2015)

As fontes de energias não renováveis, ainda muito utilizadas, possuem diversos aspectos negativos. Quando se trata de combustíveis fósseis, o uso pode trazer inúmeros problemas ambientais, como: o aquecimento global, que é causado pelo excesso de CO₂ na natureza, a chuva ácida, ocasionada pela reação entre os poluentes – óxidos de nitrogênio (N₂O, NO e NO₂) e os óxidos de enxofre (SO₂ e SO₃) - e o vapor d'água e contaminação das águas (PORTAL VERDE, 2013).

A geração de energia é a principal alimentação de sistemas de refrigeração. Esses sistemas são amplamente utilizados em diversas indústrias, variando o controle de temperatura das instalações para o conforto humano às condições de armazenamento de alimentos perecíveis, indústrias químicas e outras aplicações especiais na indústria de manufatura e construção (FRANCO et al., 2011).

Assim, este projeto tem como inspiração a conciliação de tecnologias que se caracterizam pela utilização de fontes renováveis aplicadas no processo de refrigeração. De uma forma mais específica, deseja-se analisar um sistema de troca térmica, neste caso a refrigeração por adsorção, sem a necessidade de energia externa proveniente de fontes que causam efeitos colaterais ao meio ambiente.

Os processos de adsorção sólida têm sido considerados em aplicações de bombas de calor e refrigeradores como alternativa aos sistemas convencionais a compressão de vapor, pois a tecnologia utilizada é relativamente simples. Sistemas adsorptivos podem operar sem partes móveis e com energia térmica de baixa intensidade, como a energia solar. Eles permitem a circulação de grandes quantidades de fluido refrigerante por ciclo, o que proporciona elevados rendimentos (ARAÚJO, LEITE e MARCONDES, 2000).

Tabela 1 - Algumas propriedades físicas de refrigerantes comumente utilizados em sistemas de adsorção.

Refrigerantes	Ponto de ebulição (°C)	Entalpia de vaporização H (kJ kg ⁻¹)	Densidade ρ (kg m ⁻³)	ρ × H (MJ m ⁻³)
Amônia (NH ₃)	-34	1368	681	932
Água (H ₂ O)	100	2258	958	2163
Metanol (CH ₃ OH)	65	1102	791	872
Etanol (C ₂ H ₅ OH)	79	842	789	665

Segundo Wang et al. (2009), os refrigerantes de “pressão positiva” (ponto de ebulição abaixo de -10 °C a 1 atm) podem ser utilizados com cloretos, carvão ativado e fibra de carbono ativado, por exemplo, a amônia. A água poderia ser considerada um refrigerante perfeito, contudo a baixa pressão de saturação e o ponto de fusão a 0 °C limitam seu uso. A água é normalmente utilizada em pares com sílica gel ou zeólitas. A pressão de saturação do etanol e do metanol são semelhantes (SAHA et al., 2007), porém o calor latente do metanol é cerca de 30 % maior que do etanol (Tabela 1) sendo o primeiro mais utilizado quando associado com carvão ativado ou fibra de carbono ativado.

A adsorção ocorre na superfície de contato entre um fluido e um meio poroso sólido, na qual forças de coesão agem entre as moléculas das substâncias. Um desequilíbrio nessas forças causa mudanças na concentração das moléculas, ou seja, a separação de substâncias de uma base acompanhada da acumulação em outra. Chama-se adsorvente a fase que adsorve e adsorvato o material adsorvido (RIFFEL et al., 2007).

Oliveira (2004) e Riffel et al. (2007) listaram algumas considerações importantes antes de se escolher um refrigerante para um sistema de refrigeração por adsorção, como: potencial de degradação da camada de ozônio baixo ou nulo; baixa ou nenhuma contribuição no efeito estufa, atóxico ou de baixa toxicidade e inflamável.

O processo de adsorção é exotérmico, devido à condensação e à formação de uma fase adsorvida, possibilitando assim a retirada de calor, de um meio de interesse, na fase de adsorção. A quantidade de calor envolvida depende dos pares adsorventes utilizados no processo.

A adsorção abordada neste trabalho caracteriza-se por uma operação intermitente, realizada em duas etapas: regeneração (aquecimento – etapa diurna) e a produção de frio (adsorção – etapa noturna). A etapa de regeneração inicia com a incidência da radiação solar que provoca o aumento da temperatura e pressão, ocorrendo a geração de vapor do fluido refrigerante (dessorção). À noite, ocorre a adsorção do fluido, onde o vapor gerado durante o dia retorna o recipiente que contém o par adsorvente, onde é adsorvido pelo leito poroso. Esse calor liberado durante a adsorção é transferido para o ambiente proporcionando redução significativa da temperatura (CORTEZ e SOUZA, 2006).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Escolha do par adsorvente

Infelizmente, não há refrigerantes que tenham todas as características citadas anteriormente na revisão bibliográfica. Os refrigerantes comuns para o sistema de refrigeração de adsorção são amônia, água e metanol. Algumas propriedades físicas de refrigerantes, apresentadas por Wang et al. (2009), para sistemas de adsorção são mostradas na Tabela 1.

O adsorvente ideal deve ter uma alta capacidade adsorptiva na temperatura ambiente e baixa em temperatura elevada. Uma boa condutividade térmica (para reduzir o ciclo de adsorção, baixo calor específico), quimicamente estável e baixo custo. Para aumentar a condutividade térmica, aparas de aço podem ser adicionadas junto ao adsorvente, a fim de ajudar o transporte de calor.

O adsorvato deve apresentar uma alta entalpia de vaporização, pois ela está diretamente relacionada com a carga térmica que será retirada no evaporador. Como o adsorvente possui microporos de volume fixo, quanto maior a densidade do

adsorvato, maior será sua massa adsorvida nos microporos (OLIVEIRA, 2004). O mesmo também deve possuir dimensões moleculares pequenas bem como baixa viscosidade para facilitar sua difusão. Também é de interesse alta condutividade térmica, estabilidade térmica, baixo calor específico e quimicamente estável na faixa de temperatura de trabalho (RIFFEL et al., 2007).

De acordo com as características citadas anteriormente, os pares mais utilizados são: zeolita-água, zeolita-refrigerantes-

orgânicos, sílica gel-água e carvão ativado-metanol sendo este último o de maior destaque. Li et al. (2004) realizaram um estudo experimental da utilização dos pares adsorventes carvão ativado – metanol e carvão ativado – etanol em um sistema de refrigeração para a produção de gelo. Os autores apresentam dados importantes relacionados à produção de gelo tais como massa de gelo produzida e COP (Tabela 2) e características de dessorção e adsorção do par adsorvente (Tabela 3).

Tabela - Produção de gelo utilizando carvão ativado-metanol e carvão ativado-etanol (Li et al., 2004).

Par adsorvente	Tempo de dessorção (h)	Massa inicial de água (kg)	Temperatura inicial (°C)	Tempo de adsorção (h)	Efeito refrigerante		
					Massa de gelo (kg)	Temperatura Final (°C)	COP
CAt-Met	5	6	25	18	3,45	0	0,113
CAt-Et	5	6	25	18	0,00	4	0,034
CAt-Met	6	7	16	18	4,40	0	0,105
CAt-Et	6	7	17	18	0,00	2	0,029

Legenda: CAt – carvão ativado; Met – metanol; Et – Etanol

Tabela 2 - Características de dessorção e adsorção do carvão ativado com metanol e etanol (Li et al., 2004).

	Par adsorvente	Energia de Radiação (MJ)	Tempo de Dessorção (h)	Refrigerante Desorvido (mL)	Tempo de Adsorção (h)	Refrigerante Adsorvido (mL)
EX1-1	CAt-Met	19,44	6,0	2750	18	2550
EX2-1	CAt-Et	19,44	6,0	2450	18	950
EX1-2	CAt-Met	14,58	4,5	2150	18	2050
EX2-2	CAt-Et	14,58	4,5	800	18	400
EX1-3	CAt-Met	19,44	6,0	2550	18	2550
EX2-3	CAt-Et	19,44	6,0	600	18	600

Apesar do baixo COP apresentado pelo par adsorvente carvão ativado-etanol, cerca de 3 vezes menor que o COP do par carvão ativado-metanol (Tabela 2), neste trabalho, será utilizado o etanol como refrigerante devido a periculosidade e toxicidade do metanol. Além disso, na aplicação em questão, não se necessita de temperaturas muito baixas e como pode-se observar na Tabela 2, mesmo tendo um coeficiente de performance baixo, o par carvão ativado-etanol, permite obter temperatura (do meio a ser resfriado) de aproximadamente 4 °C. Esta temperatura atingida supre a necessidade da aplicação.

2.2 Protótipo de refrigeração por adsorção

A ideia é a aplicação do fenômeno de adsorção para um sistema de refrigeração solar a ser utilizado para resfriamento de bebidas.

Para o estudo experimental da adsorção, foi construído um protótipo de pequena escala, Figura 1. O sistema consiste em um recipiente de formato cilíndrico [1] conectado a uma serpentina [2], através de uma tubulação, que serão utilizados como o sorsor (cilindro) e como condensador/evaporador (serpentina). A válvula inferior [3] possibilita, ou não, o transporte de massa. A válvula superior [4] é conectada ao sistema para submissão de vácuo na serpentina, com o objetivo de facilitar o fenômeno de dessorção (desprendimento do etanol do carvão).

No recipiente cilíndrico encontra-se o carvão ativado e etanol anidro. Esses são aquecidos através de uma chapa de aquecimento (simulando a energia solar), deste modo o etanol anidro recebe o calor para ocorrer a dessorção. O vapor gerado

transfere-se para a serpentina onde se condensa.

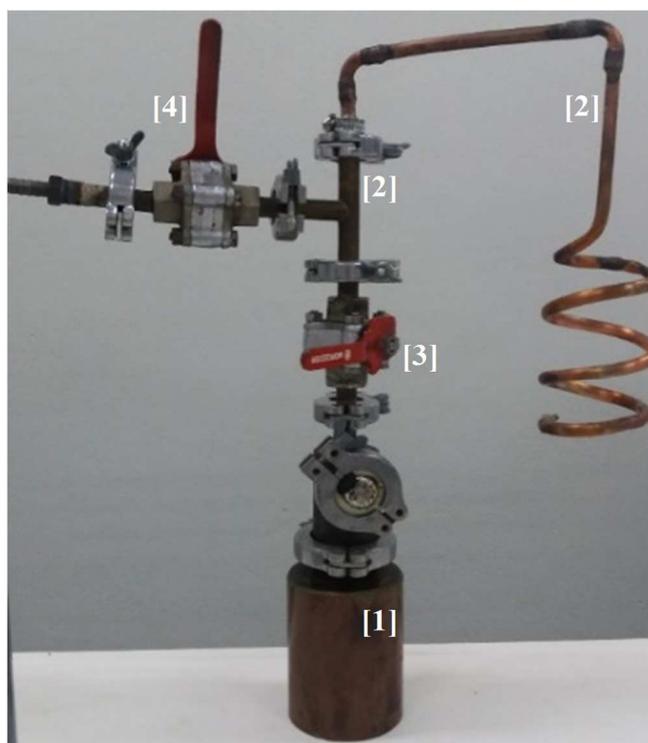


Figura 1 - Protótipo para realização dos testes experimentais.

Após a passagem do etanol, a válvula existente entre o recipiente e a serpentina pode ser fechada, impedindo que o

etanol volte para a etapa inicial pelo meio da adsorção. A mesma é aberta novamente quando se deseja resfriar as vizinhanças da serpentina (devido ao calor que o etanol precisa receber para mudança de fase).

2.3 Modelagem matemática

Os modelos desenvolvidos por Khattab (2006) serão utilizados para o sistema de refrigeração por adsorção. Para melhor entendimento do fenômeno, é necessário ter conhecimento das etapas do ciclo de Clapeyron (Figura 2).

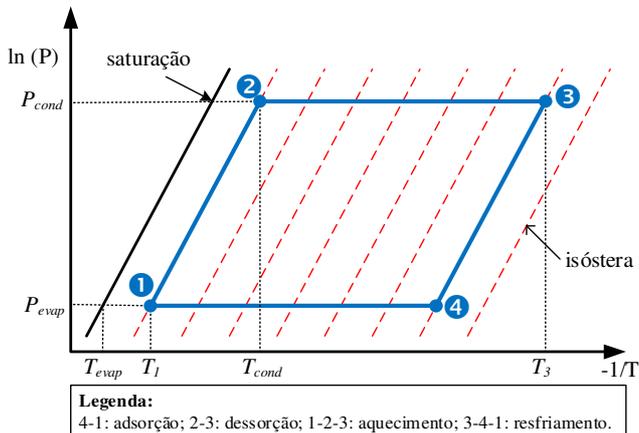


Figura 2 - Ciclo de refrigeração adsorptivo no diagrama de Clapeyron

O ciclo parte do ponto (1), onde há a menor condição de pressão e temperatura. Durante o dia, há o aquecimento do recipiente o qual contém o par adsorvato/adsorvente e para facilitar a transferência de calor, aparas de aço. Devido ao aquecimento, a temperatura e pressão do mesmo se elevam seguindo uma isóstera até atingir o ponto (2). A concentração mássica de adsorvato no adsorvente se mantém constante, uma vez que o escoamento daquele para o condensador encontra-se interrompido pela válvula. A energia Q_{1-2} utilizada para elevar a temperatura do mesmo é dada pela Eq. 1.

$$Q_{1-2} = (M_{carvão} \times Cp_{carvão} + Cp_{etanol} \times M_{etanol-1} + M_{aço} \times Cp_{aço}) \times (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Quando a válvula é aberta possibilita-se a transferência de massa, Etapa 2-3. Posteriormente, a válvula de retenção é fechada. A energia $Q_{(2-3)}$ utilizada para o aquecimento do carvão ativado até o ponto (3) e a dessorção do etanol é representada pela Eq. 2.

$$Q_{2-3} = \left[M_{carvão} \times Cp_{carvão} + Cp_{etanol} \times \left\{ \frac{M_{etanol-1} + M_{etanol-3}}{2} \right\} + M_{aço} \times Cp_{aço} \right] \times (T_3 - T_2) + (M_{etanol-1} - M_{etanol-3}) \times H \quad (2)$$

Logo, a energia total Q_T recebida pelo sistema durante o processo de aquecimento é dada pela Eq. 3.

$$Q_T = Q_{1-2} + Q_{2-3} \quad (3)$$

Durante a noite, ocorre a evaporação na câmara de evaporação (serpentina). Para ocorrer a vaporização do etanol, é necessária uma fonte de energia para a transformação de fase do mesmo. Essa fonte de energia será provinda do fluido que se deseja resfriar (o qual está fora do equipamento, nas vizinhanças da serpentina).

Quando a válvula é aberta, há evaporação do etanol para o carvão ativado e transferência de massa. Durante esse período, adsorção (no cilindro) e evaporação (na serpentina) ocorrem simultaneamente. O calor necessário para vaporização do etanol é fornecido pela Eq. 4.

$$Q_{e1} = (M_{etanol-1} - M_{etanol-3}) \times L_m \quad (4)$$

O adsorvato (etanol) também perde calor, correspondente a variação de temperatura de evaporação e condensação Eq. 5.

$$Q_{e2} = (M_{etanol-1} - M_{etanol-3}) \times Cp_{etanol} \times (T_{cond} - T_{evap}) \quad (5)$$

A energia que é verdadeiramente usada para refrigeração é Q_e , correspondente à diferença entre Q_{e1} e Q_{e2} , representada pela Eq. 6.

$$Q_e = Q_{e1} - Q_{e2} \quad (6)$$

O fluido que se deseja refrigerar sofre diminuição de temperatura, ou seja, o calor envolvido é sensível. Esse calor pode ser dado pela Eq. 7.

$$Q_a = [M_{fluido\ refrigerado} \times Cp_{fluido\ refrigerado}] (\Delta T) \quad (7)$$

Uma informação importante em qualquer ciclo de refrigeração é o conhecimento da eficiência deste ciclo (Eq. 8) e o Coeficiente de Performance COP, (Eq. 9).

$$\eta_1 = \frac{Q_a}{Q_e} \quad (8)$$

$$COP = \frac{Q_a}{Q_T} \quad (9)$$

2.4 Ensaios Realizados

Para a realização dos ensaios o carvão a ser utilizado deve ser totalmente isento de umidade, pois a mesma ocupa os poros do carvão ativo, impedindo assim a adsorção do etanol. Para esta finalidade, o carvão foi submetido a uma temperatura de 250 °C em uma estufa por 24 h e posteriormente armazenado em um dessecador a vácuo.

Anteriormente ao ensaio de inserção de energia, foi determinada a potência da chapa de aquecimento, sendo quantificada através da energia (sensível e latente) adicionada a um volume de controle com água e o tempo do experimento.

Inserção de energia ao sistema: No ensaio de inserção de energia, o sistema inicia o processo em vácuo, ou seja, um gradiente de pressão é aplicado entre o ponto que o álcool se encontra inicialmente (cilindro) e o ponto onde ele se destinará (serpentina), facilitando assim o transporte de massa do etanol adsorvido em carvão para serpentina.

Para tal, a válvula na posição superior, que permite a formação do vácuo, está aberta e conectada em uma bomba de vácuo. Já a inferior, do recipiente com o par adsorvato/adsorvente, encontra-se fechada. A bomba é ligada e o vácuo formado, então a válvula superior é fechada. Em seguida, a inserção de energia é iniciada.

A parte do protótipo que contém o carvão e o etanol é imersa no recipiente de vidro contendo água em ebulição (promovida pela chapa de aquecimento), a fim de receber a

energia necessária para proporcionar a dessorção de parte do etanol no carvão.

O momento em que a válvula inferior é aberta ocorre o transporte de massa do cilindro para serpentina. Ao término do aquecimento, a mesma válvula deve ser fechada. Tal válvula pode ser aberta em diferentes tempos de um ensaio, para que situações distintas sejam testadas e análise de seus resultados.

A serpentina atuará como condensador (quando etanol é dessorvido) e evaporador (quando etanol é adsorvido). Uma vez que o etanol é condensado na serpentina, é possível fazer o resfriamento de algum líquido (sendo escolhida a água para experimento) devido a ocorrência dos fenômenos de evaporação (na serpentina) e adsorção (no carvão do recipiente cilíndrico).

Para que o resfriamento da água em volta da serpentina ocorra, é preciso que o recipiente com carvão esteja em temperatura ambiente pois altas temperaturas promovem a dessorção do etanol em carvão, assim dificultando a adsorção. Esse critério sendo atendido promove o resfriamento, então a válvula inferior é aberta.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Inserção de energia ao sistema

O ensaio de inserção de energia foi realizado de duas maneiras distintas. O primeiro ensaio com a válvula inicialmente fechada e os demais ensaios foram realizados com a válvula aberta durante todo o processo. Para todos os ensaios,

Tabela 4 – Dados das constantes de todos os ensaios (Khattab, 2005).

Variável	Descrição	Valor	unidade
$C_{p_{\text{carvão}}}$	Calor específico do carvão	0,70	$\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$C_{p_{\text{etanol}}}$	Calor específico do etanol	2,40	$\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$C_{p_{\text{água}}}$	Calor específico da água	4,18	$\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
H_v	Entalpia do vapor saturado	2672,21	kJ kg^{-1}
h_l	Entalpia do líquido saturado	414,81	kJ kg^{-1}
L_m	Constante do calor latente da água	842	kJ kg^{-1}
H	Calor de dessorção	1094,60	kJ kg^{-1}

Tabela 5 - Dados experimentais obtidos no ensaio com a válvula inicialmente fechada.

Variável	Descrição	Valor	unidade
$M_{\text{etanol}(1)}$	Massa de etanol utilizada	0,06599	kg
$M_{\text{carvão}}$	Massa de carvão utilizada	0,21980	kg
M_{wi}	Massa inicial de água no R2	0,600	kg
M_{wf}	Massa final de água no R2	0,265	kg
M_v	Massa de água evaporada no R2	0,335	kg
T_i	Temperatura inicial da água no R2	85,00	$^\circ\text{C}$
T_f	Temperatura final água no R2	98,00	$^\circ\text{C}$
t_1	Tempo de aquecimento com válvula aberta	15,00	min
t_2	Tempo de aquecimento com válvula fechada	35,00	min
T_{wi}	Temperatura inicial da água de resfriamento	25,00	$^\circ\text{C}$
T_{wf}	Temperatura final da água de resfriamento	25,00	$^\circ\text{C}$
P	Potência da chapa utilizada	410,2	W

R2 – recipiente contendo água utilizada para o aquecimento do protótipo

O calor Q_{2-3} por sua vez considera a transferência de massa, pois a válvula já está aberta, e uma consideração para os presentes cálculos é que todo etanol se vaporiza e vai para a serpentina. A parte do calor sensível de Q_{2-3} é igual a zero, uma vez que o sistema começa a transferência de massa quando já está na mesma temperatura da água em ebulição (devido ao longo tempo que ambos estiveram em contato). Portanto o calor Q_{2-3} é o calor isótero (calor utilizado para dessorção) segundo

foi considerada uma temperatura ambiente de $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ e os valores das variáveis foram considerados conforme descrito na Tabela 4.

3.2 Ensaio com válvula inicialmente fechada

Neste ensaio, iniciou-se o aquecimento com a válvula fechada. Uma das considerações dos equacionamentos é que o perfil de temperatura dentro do sistema carvão/etanol é igual. A válvula fechada auxilia essa consideração ser verdadeira. O motivo é que não há dessorção, portanto, a energia não está sendo usada para a mudança de fase, dessa forma, a homogeneização de temperatura é facilitada. Após um determinado período de tempo, a válvula foi aberta, proporcionando então a transferência de massa. Sendo os dados coletados apresentados na Tabela 5.

Na inserção de energia inicial (Q_{1-2}), há apenas calor sensível, não há vaporização ou transporte de massa, pois a válvula está fechada. Nesse ensaio é considerado os valores coletados e sua respectiva variação de temperatura. As mesmas foram adotadas seguindo sua temperatura inicial (T_a) e a temperatura final (T_f). A temperatura final é a de ebulição da água e nunca uma superior a essa, pois o sistema não pode ultrapassar a temperatura do seu fluido de aquecimento. Esse ensaio não contou com as aparas de aço ($M_{\text{aço}} = 0$). Utilizando a Eq. 1 temos que a energia inicial inserida ao sistema é $Q_{1-2} = 22,79 \text{ (kJ)}$.

a Eq. 2 temos $Q_{2-3} = 89,25 \text{ (kJ)}$. E o calor total inserido no sistema é a soma dos calores anteriores, ou seja, $Q_T = 112,04 \text{ (kJ)}$.

É considerado que todo etanol que vaporizou e condensou na serpentina volta para o carvão. Agora o etanol está vaporizando sozinho, não há interação com carvão na serpentina, logo o calor é unicamente latente, e não isótero como antes. Dessa maneira, a energia Q_{e1} é a de vaporização do

etanol (Eq. 4) sendo $Q_{e1} = 55,56$ (kJ). Uma vez calculados Q_T e Q_{e1} , pode-se pela Eq. 9 calcular o coeficiente de performance como sendo $COP = 0,496$.

O calor total (Q_T) também foi calculado de maneira única e exclusivamente experimental, para questão de comparação. Sendo feito um balanço macroscópico de energia com um volume de controle constituído de: água (de aquecimento), cilindro metálico, carvão e etanol. A energia que entra no sistema é conhecida pelo ensaio de potência, e a saída corresponde à massa de vapor de água que sai do sistema. O restante de energia foi utilizado dentro do volume de controle para acúmulo.

Por meio do balanço de energia macroscópico ($Q_{entra} - Q_{sai} = Q_{acumulo}$) representado pela Eq. 10, obtém-se uma quantidade de calor total de $QT = 569,50$ (kJ).

$$P \times t - m_v \times H_v = m_{wi} \times cp \times (Tf - Ti) - m_v \times h_l + Q_T \quad (10)$$

Constata-se que o calor inserido no sistema, para as respectivas massas adicionadas, seria de 112,04 (kJ), contudo o valor empregado calcula pela Eq. 10 foi de 569,50 (kJ), ou seja, superior ao que se necessitava. No entanto, mesmo assim, não houve resultados no resfriamento. O mesmo cálculo e conclusão também acontece no ensaio posterior intitulado VADTP-01.

Para ajuste de situações, os erros possíveis e passíveis de correção foram alterados. As decisões tomadas para próximo ensaio são: aumentar a quantidade de etanol no sistema e começar o aquecimento com a válvula aberta (possibilitando

assim transferência de massa por mais tempo).

3.3 Ensaio com válvula inicialmente aberta

O cilindro do protótipo, contendo etanol e carvão, está com a válvula aberta. Sendo realizados seis ensaios nessa situação.

A válvula é aberta, pois o calor Q_{1-2} (Eq. 1), que seria a energia inserida no cilindro do protótipo com a válvula fechada (sem transporte de massa), é dependente das seguintes constantes: massa do carvão, calor específico do carvão, massa total do etanol, calor específico do etanol.

O calor Q_{2-3} (Eq. 2) acontece ao mesmo tempo em que há transferência de massa do cilindro do protótipo para a serpentina. Esse é dependente das mesmas constantes que o caso anterior, com exceção da massa do etanol, que aqui é menor, sendo uma média entre a massa de etanol inicial, correspondente a toda massa de etanol, e a massa de etanol que persiste no carvão. Logo, a somatória de todas as constantes é um número menor. Por isso toda a variação de temperatura do sistema é empregada com a válvula aberta, pois com a variação de temperatura multiplicando uma constante menor dará um calor menor, diminuindo por consequência o calor total (Q_T), aumentando assim o COP. O que pode ser que na situação real nos leve a melhores resultados que o ensaio anterior.

Analisando a Figura 2, observa-se que a massa de etanol no ponto (1) é a total, já a do ponto (3), se considerado dessorção total, é igual a zero (não havendo etanol adsorvido em carvão). Nos experimentos foram obtidos os dados apresentados na Tabela 6, sendo esses ensaios não utilizando aparas de aço.

Tabela 6 - Dados experimentais obtidos nos ensaios com a válvula inicialmente aberta.

Variável	Descrição		VADTP-	VADTP-	VADTP-	VADTP-	VADTP-	VADTP-
			01	02	03	04	05	06
$M_{etanol(1)}$	Massa de etanol utilizada	kg	0,18889	0,22622	0,21367	0,21547	0,21211	0,21689
$M_{carvão}$	Massa de carvão utilizada	kg	0,22193	0,19532	0,19377	0,19595	0,17050	0,20738
M_{wi}	Massa inicial de água no R2	kg	0,74760	1,98063	3,68259	2,25820	2,74141	3,20030
M_{wf}	Massa final de água no R2	kg	0,38760	0,87510	1,96615	1,63530	2,02410	2,11110
M_v	Massa de água evaporada	kg	0,36000	1,10553	1,71644	0,62290	0,71731	1,08920
T_i	Temperatura inicial água no R2	°C	84	60	86	79	82	75
T_f	Temperatura final água no R2	°C	98	90	93	85	82	85
t_1	Tempo de aquecimento	min	41,30	305	180	210	210	110
T_{wi}	Temperatura inicial da água de resfriamento	°C	25,0	26,7	25,0	25,0	20,0	24,0
T_{wf}	Temperatura final da água de resfriamento	°C	25,0	26,5	24,0	25,0	18,9	24,0
M_{resfr}	Massa de água utilizada para resfriar	kg	0,49312	0,49412	0,20466	0,19891	0,19962	0,19179
t_{resf}	Tempo de resfriamento	min	50	50	30	30	30	30
P	Potência da chapa utilizada	W	410,2	410,2	410,2	410,2	410,2	410,2

Os ensaios VADTP-01, VADTP-02, VADTP-03 foram realizados com uma bacia de vidro com água em ebulição para aquecimento. Já o restante foi realizado com um béquer de 3L, o qual promove maior área de contato, portanto, maior transferência de calor.

O resfriamento do fluido de vizinhança da serpentina, a água, e sua variação de temperatura são usados para estimar quanto de massa de etanol realmente compreendia na serpentina. Devido as respectivas trocas de energia da água e etanol, é possível recalculer o COP em uma situação real.

Com a variação de temperatura medida e apresentada na Tabela 7, foi possível recalculer o Q_{e1} (Eq. 4). Para tal, considera-se que a energia retirada do meio, ou seja, da água é igual a energia latente de vaporização do etanol. A quantidade de energia Q_{e2} (Eq.5) é desconsiderada por ser, comparativamente ao Q_{e1} , um valor baixo. Além do protótipo não fornecer a variação de temperatura (calor sensível) do etanol, dificultando o cálculo de Q_{e2} . Logo Q_a (Eq.7) é numericamente igual a Q_{e1} .

Tabela 7 – Valores calculados para os ensaios com a válvula inicialmente aberta.

Variável	Descrição		VADTP-	VADTP-	VADTP-	VADTP-	VADTP-	VADTP-
			01	02	03	04	05	06
Q ₂₋₃	Calor envolvido no ponto 2-3	kJ	234,65	274,15	260,54	259,6	253,49	261,74
Q _{e1}	Calor no ponto 1	kJ	159,04	190,48	179,91	181,43	178,6	182,62
COP	Coeficiente de Performance	–	0,678	0,695	0,691	0,690	0,700	0,700
ΔT	Variação de temperatura	°C	0,0	0,2	1,0	0,0	1,1	0,0
Q' _{e1}	Calor no ponto 1 recalculado	kJ	-	0,41	0,86	-	0,92	-
M _{ev}	Massa de etanol vaporizada	kg	-	0,000487	0,00102	-	0,00109	-
Q' ₂₋₃	Calor envolvido no ponto 2-3 recalculado	kJ	-	44,67	45,20	-	38,13	-
COP'	Novo COP'	–	-	0,009	0,019	-	0,020	-

Analisando os resultados, é notável que a hipótese de que todo etanol vaporizou completamente e se dirigiu a serpentina não se confirma. Com o calor Q_a, que é numericamente igual a Q_{e1}, calcula-se a massa de etanol vaporizada, que é a diferença M_{etanol-1} - M_{etanol-3} (Eq. 4).

Como Q₂₋₃, que é o Q_T (Eq. 3), é dependente da variação de massa de etanol, esse também é recalculado para nova situação, obtemos assim Q'₂₋₃. Dessa forma um novo COP' pode ser obtido.

O valor obtido de COP é menor do que o primeiramente calculado, considerando dessorção total, durante o aquecimento, e evaporação e sorção total, durante o resfriamento. Ou seja, a hipótese não é verdadeira e mais ensaios são necessários para confirmar o resultado e levantar novas hipóteses, de maneira a acertar o ocorrido no sistema.

3.4 Ensaio para a investigação dos fenômenos

Afim da investigação dos fenômenos, foi promovido o Ensaio 7 com o objetivo de averiguar algumas ideias, como: existência de vazamento no protótipo e carvão ativo com baixo poder de adsorver de volta o etanol por estar perto do seu estado de saturação.

A serpentina possui um volume de 31 mL então para ocupar tal volume seriam necessários 24,49 g de etanol anidro, levando em conta a densidade apresentada pelo próprio fabricante do etanol utilizado. Diante disso, foi adicionado no cilindro de cobre 93,95 g de etanol anidro para garantir excesso e nenhum carvão.

O processo inicial de aquecimento contou, dessa forma, com calor latente de evaporação e não com calor isótero, como antes. Ao final do processo de inserção de energia, o recipiente

cilindro foi desconectado, o etanol remanescente, não vaporizado, foi contabilizado e então o carvão ativo isento de qualquer umidade foi adicionado no cilindro.

Embora a água de aquecimento estivesse a 85 °C, o cilindro não se estava nessa temperatura. Duas razões são fundamentais: o etanol está vaporizando, logo, recebendo calor para sua troca de estado, calor latente, ocasionando em uma menor temperatura do protótipo do que do seu meio de aquecimento; o calor está sendo transferido para todo o protótipo por condução em sólido.

As temperaturas do cilindro metálico e da água foram monitoradas. Como é de se esperar a força motriz para troca de calor, diferencial de temperatura, foi diminuindo ao longo do tempo e se estabilizou após 26 minutos de ensaio. Os próximos 34 minutos de ensaio não obtiveram mudanças nas temperaturas observadas.

O acontecimento provável é que o etanol parou de evaporar e a existência do diferencial só existe por causa da condução de calor dentro do próprio protótipo. O ensaio não precisa continuar e se encerra.

O etanol remanescente no cilindro foi de 11,78 g, ou seja, 82,17 g foram evaporadas. O que aponta a existência de vazamento, já que toda essa massa não caberia na serpentina. Contudo, como pode ser observado na Tabela 8, somente 0,3 °C de temperatura foram retirados do sistema com água.

Quanto a hipótese de possível baixa adsorvidade do carvão ativo e etanol não procede. Mesmo com carvão completamente seco, os resultados observados não obtiveram grande diferença, ou seja, o problema não reside na capacidade adsorviva do par escolhido.

Tabela 8 - Dados experimentais obtidos no ensaio para investigação dos fenômenos

Variável	Descrição	VADPT-07	unidade
M _{etanol(1)}	Massa de etanol utilizada	0,09395	kg
M _{carvão}	Massa de carvão utilizada	0,15150	kg
M _{wi}	Massa inicial de água no R2	1,79941	kg
M _{wf}	Massa final de água no R2	1,49340	kg
M _v	Massa de água evaporada	0,30601	kg
T _i	Temperatura inicial água no R2	85,00	°C
T _f	Temperatura final água no R2	85,00	°C
t _i	Tempo de aquecimento	63,00	min
T _{wi}	Temperatura inicial da água de resfriamento	22,70	°C
T _{wf}	Temperatura final da água de resfriamento	22,40	°C
M _{resf}	Massa de água utilizada para resfriar	0,1971	kg
t _{resf}	Tempo de resfriamento	70	min
P	Potência da chapa utilizada	157,87	W

3.5 Ensaio com aparas de aço

Os ensaios posteriores contaram com a adição de aparas de aço, o qual é um bom condutor de calor, ao carvão, deste modo facilitando a transferência de calor e conseqüentemente,

favorecendo também a transferência de massa, uma vez que em temperaturas altas, a dessorção do álcool é promovida. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 9. Os mesmos cálculos dos ensaios anteriores são aplicados e os resultados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 9 – Dados experimentais para os ensaios com a válvula inicialmente aberta com aparas de aço.

Variável	Descrição		VADTP-0	VADTP-0	VADTP
$M_{\text{etanol}(1)}$	Massa de etanol utilizada	(kg)	0,22130	0,22049	0,25570
$M_{\text{carvão}}$	Massa de carvão utilizada	(kg)	0,17168	0,17280	0,14924
$M_{\text{aço}}$	Massa de aparas de aço utilizada	(kg)	0,05070	0,05010	0,05067
M_{wi}	Massa inicial de água no R2	(kg)	2,46107	-	-
M_{wf}	Massa final de água no R2	(kg)	1,81530	-	-
M_{v}	Massa de água evaporada	(kg)	0,64577	-	-
T_{i}	Temperatura inicial água no R2	(°C)	82	85	-
T_{f}	Temperatura final água no R2	(°C)	83	92	-
t_{i}	Tempo de aquecimento	(min)	180	300	420
T_{wi}	Temperatura inicial da água de resfriamento	(°C)	21,8	25,8	24,2
T_{wf}	Temperatura final da água de resfriamento	(°C)	21,1	24,3	22,0
M_{resfr}	Massa de água utilizada para resfriar	(kg)	0,20815	0,25967	0,22420
t_{resf}	Tempo de resfriamento	(min)	60	224	187

Tabela 10 – Valores calculados para os ensaios com a válvula inicialmente aberta com aparas de aço.

Variável	Descrição		VADTP-08	VADTP-09	VADTP-10
Q_{2-3}	Calor envolvido no ponto 2-3	kJ	264,61	264,29	303,07
Q_{e1}	Calor no ponto 1	kJ	186,33	185,65	215,30
COP	Coefficiente de Performance	-	0,704	0,702	0,710
ΔT	Variação de temperatura	°C	0,7	1,5	2,2
Q'_{e1}	Calor no ponto 1 recalculado	kJ	0,61	1,628	2,063
M_{ev}	Massa de etanol vaporizada	kg	0,000723	0,0001936	0,000245
Q'_{2-3}	Calor envolvido no ponto 2-3 recalculado	kJ	39,10	38,49	40,16
COP'	Novo COP'	-	0,016	0,042	0,051

O Ensaio VADTP-10, diferentemente dos ensaios que se procederam, foi completamente realizado sob o sol. Ou seja, não houve o menor custo na inserção de energia do sistema. O resfriamento obtido foi completamente gratuito e sustentável.

Por ter sido realizado fora das dependências do Centro Universitário, não foi possível a medição da temperatura do cilindro no processo. Porém para efeito de comparação, é admitido 80°C para efeito de cálculos. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 7.

Este ensaio mais sustentável, possui o maior COP, ou seja, o ensaio que não teve custo foi o com maior poder de resfriamento, resfriando 2,2°C do fluido de interesse, a água.

Os resultados positivos obtidos podem ser atribuídos a alguns fatores. Com o aquecimento solar, o cilindro e a tubulação que o conecta a serpentina se aquecem. Dessa forma, com um aquecimento mais homogêneo ao longo do protótipo como um todo, pode ajudar ao transporte de massa.

O álcool vaporizado pode se condensar nas paredes da tubulação antes de chegar ao cilindro. Quando isso acontece, o mesmo volta, na forma líquida, para o carvão. Com o aquecimento do protótipo como um todo, como a tubulação está sensivelmente mais quente, a condensação do etanol ao longo do caminho para serpentina é reduzida, por conseqüência, uma maior massa consegue chegar a serpentina.

O período de transporte do protótipo do seu local de aquecimento para o Centro Universitário para a quantificação de resfriamento, proporciona um longo tempo de resfriamento a

temperatura ambiente ao par adsorvente/adsorvato. O que leva a temperatura do meio a uma boa faixa para que ocorra a adsorção. Levando em conta que em baixas temperaturas e baixo grau de agitação das moléculas levam a uma resistência ao transporte de massa e altas temperaturas favorecem a dessorção. Portanto, existe uma faixa de temperatura propícia que favorece o processo de adsorção de etanol no carvão, sendo essa em torno da temperatura ambiente.

4. CONCLUSÃO

O ensaio com menor custo e maior sustentabilidade, que reproduz mais fielmente o como de fato a ideia deve ser empregada, também é aquele com maior COP, ou seja, o ensaio que não teve custo algum foi, felizmente, o com maior poder de resfriamento, retirando 2,063 kJ do fluido de interesse, a água, sendo que o segundo melhor dado coletado foi de 1,628 kJ. A temperatura na qual a adsorção do etanol em carvão ativo é favorecida, em torno da temperatura ambiente, é um fator fomentador para tal tipo de refrigeração. Uma vez que essa é uma faixa que é obtida gratuitamente, o carvão inevitavelmente irá com o tempo, chegar a temperatura ambiente. Visando a execução do objetivo, o projeto se demonstra positivo comprovando o fenômeno da adsorção. Constatando que foi possível um resfriamento mesmo com pouca massa de etanol em um protótipo de pequena escala, sem qualquer utilização de fonte de energia que degrade, direta ou indiretamente o meio ambiente.

Juntando o conhecimento científico e a operabilidade, com o intuito de uma pesquisa de engenharia, os estudos apontam para uma nova maneira de se realizar

refrigeração. A maneira como se faz refrigeração pode e deve ser mudada, objetivando sempre a sustentabilidade e menores custos de operação, que no presente caso é nulo.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Universitário FEI pelo suporte financeiro para o desenvolvimento do trabalho e ao Prof. Dr. Vivaldo Silveira Jr (Faculdade de Engenharia de Alimentos – FEA, UNICAMP) pelo ajuda na confecção do módulo experimental.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, A. L. S., LEITE, A. P. F., MARCONDES, F. Simulação do ciclo de adsorção em um refrigerador solar. **In: Anais do CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Natal, Brasil, 2000.
- CORTEZ, M. F. B., SOUZA, W. R. Análise térmica de um reator tubular de um refrigerador solar à adsorção operando com carvão ativo e metanol. **In: Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT 2006**, Curitiba, Brasil, 2006.
- EIA. Overview: Brazil is the 8th-largest total energy consumer and 9th-largest liquid fuels producer in the world. 2015. Disponível em: <<https://www.eia.gov/beta/international/analysis.cfm?iso=BRA>>. Acesso em: 25 mar. 2017.
- FRANCO, I. C., DALL'AGNOL, M., COSTA, T. V., A. M. F. FILETI, SILVA, F. V. A neuro-fuzzy identification of non-linear transiente systems: Application to a pilot refrigeration plant. **International Journal of Refrigeration** 34, 2063-2075, 2011.
- KHATTAB, N. M. Simulation and optimization of a novel solar-powered adsorption refrigeration module. **Solar Energy** 80(7), 823-833, 2006.
- LI, M., HUANG, H. B., WANG, R. Z., WANG, L. L., CAI, W. D., YANG, W. M. Experimental study on adsorbent of activated carbono with refrigerante of metanol and etanol for solar ice maker. **Renewable Energy** 29, 2235-2244, 2004.
- PORTAL VERDE. Fatores prejudiciais da utilização dos combustíveis fósseis. 2013. Disponível em: <<http://www.pensamentoverde.com.br/meio-ambiente/fatores-prejudiciais-utilizacao-combustiveis-fosseis/>>. Acesso em: 25 mar. 2017.
- RIFFEL, D. B., BELO, F. A., LEITE, A. P. F. Ar condicionado solar por adsorção: Fundamentos e estado da arte. **In: I Congresso Brasileiro De Energia Solar (I CBENS)**, Fortaleza, Brasil, 2007.
- SAHA, B. B., EL-SHARKAWY, I. I., CHAKRABORTY, A., KOYAMA, S. Study on an activated carbon fiber-ethanol adsorption chiller. Part I – system description and modelling. **International Journal of Refrigeration** 30, 86-95, 2007.
- WANG, L. W., WANG, R. Z.; OLIVEIRA, R. G. A review on adsorption working pairs for refrigeration. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 26, 518-524, 2009.