Destilação solar do solvente etanol proveniente da extração de óleo de coco**Solar distillation of ethanol solvent used in coco oil extraction**

DOI:10.34117/bjdv5n12-066

Recebimento dos originais: 17/11/2019

Aceitação para publicação: 05/12/2019

Lucas Rodrigo Custódio Silva

Mestre em Química pela Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Instituição: Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Endereço: Av. Dr. Randolpho Borges Jr. N 1400, ICTE, UFTM, Bairro Univerdecidade,
Uberaba – MG, Brasil

Email: lucasrodrigo@me.com

Marina Barbosa Maluf Ribeiro

Bacharel em Engenharia Química

Instituição: Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Endereço: Av. Dr. Randolpho Borges Jr. N 1400, ICTE, UFTM, Bairro Univerdecidade,
Uberaba – MG, Brasil

Email: marinabmaluf@gmail.com

Amanda Dornelas Oliveira

Bacharel em Engenharia Química

Instituição: Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Endereço: Av. Dr. Randolpho Borges Jr. N 1400, ICTE, UFTM, Bairro Univerdecidade,
Uberaba – MG, Brasil

Email: amanda_dornelas22@hotmail.com

Caroline Santos Silva

Bacharel em Engenharia Química

Instituição: Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Endereço: Av. Dr. Randolpho Borges Jr. N 1400, ICTE, UFTM, Bairro Univerdecidade,
Uberaba – MG, Brasil

Email: caroline_santos04@hotmail.com

Érica Victor de Faria

Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Uberlândia

Instituição: Universidade Federal de Uberlândia

Endereço: Av. Joao Naves de Ávila 1000, FEQUI, Bloco K, Bairro Santa Mônica,
Uberlândia – MG, Brasil

Email: erica-victor@hotmail.com

Kássia Graciele dos Santos

Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal de Uberlândia

Instituição: Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Endereço: Av. Dr. Randolpho Borges Jr. N 1400, ICTE, UFTM, Bairro Univerdecidade,
Uberaba – MG, Brasil
Email: kassia.santos@uftm.edu.br

RESUMO

O uso da energia solar como fonte de energia renovável tem se tornado uma boa alternativa sustentável nos dias de hoje e seu emprego tem crescido. Os destiladores solares têm como fonte de energia a luz solar, afim de tornar o processo de destilação mais sustentável. Nesse contexto, o presente trabalho consistiu em destilar uma mistura de etanol e óleo de coco com a intenção de reuso do solvente em futuros experimentos, de maneira a tornar o processo mais econômico e sustentável. Para o processo de destilação, construiu-se um destilador solar de duas vertentes variando-se três volumes de mistura a serem colocados para destilação em batelada, a fim de estudar a influência da espessura da película na eficiência da recuperação do solvente. Obteve-se um rendimento máximo de 84,2% e a espessura de líquido ótima obtida através dos experimentos foi de 0,16 cm, na qual, obteve-se a maior taxa de recuperação do álcool. O presente trabalho mostrou-se satisfatório com relação aos objetivos propostos, apresentando um processo completamente sustentável e sem gastos energéticos.

Palavras-Chave: Energia Solar. Etanol. Destilação Solar. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The use of solar energy as a renewable energy source has become a good sustainable alternative today and its employment has grown. Solar distillers are powered by sunlight to make the distillation process more sustainable. In this context, the present work consisted of distilling a mixture of ethanol and coconut oil with the intention of solvent reuse in future experiments, in order to make the process more economical and sustainable. For the distillation process, a two-strand solar distiller was constructed by varying three volumes of mixture to be placed for batch distillation in order to study the influence of film thickness on solvent recovery efficiency. A maximum yield of 84.2% was obtained and the optimum liquid thickness obtained through the experiments was 0.16 cm, where the highest alcohol recovery rate was obtained. The present work was satisfactory in relation to the proposed objectives, presenting a completely sustainable process and without energy expenditure.

Keywords: Solar Energy. Ethanol. Solar Distillation. Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Uma extensa lista de trabalhos têm sido relatados na literatura quanto o uso da energia solar empregado nos processos de destilação da água, seja para obtenção de água potável (SOARES, 2004; CRUZ, 2012-A; MARINHO et al., 2012) ou para tratamento de efluentes (RAMOS, 2009; COSTA 2008; SOUZA 2010), visando melhorar a qualidade dos mesmos para despejo.

Sabe-se que a destilação é uma Operação Unitária que integra o conjunto das operações baseadas na transferência de massa. O mecanismo subentendido a esta operação de separação

é o do equilíbrio líquido/vapor. Ao fornecer calor a uma mistura líquida, se promovermos a sua vaporização parcial, obtemos duas fases, uma líquida e outra de vapor, que têm composições diferentes. As aplicações industriais do processo de destilação são várias, sendo uma das mais conhecidas a separação de misturas de hidrocarbonetos na indústria petroquímica.

A aplicação do processo de destilação solar foi estudada para a finalidade de recuperação de etanol, empregado anteriormente como solvente na extração de oleoresina de coco (*Cocos nucifera*) cuja concentração em extrato etanólico permitiu que a destilação se mostrasse vantajosa na possível reutilização.

No processo de extração por solvente, normalmente utiliza-se o hexano como solvente, que tem ponto de ebulição ao redor de 70°C. Apesar de seu alto poder extrativo, o hexano começou a perder espaço como solvente no mercado a partir do final da década de 1970, visto que nesse período teve um aumento no preço de derivados de petróleo (CRUZ, 2012-b). Além disso, a preocupação com sua toxicidade e seus efeitos ao meio ambiente, levaram pesquisadores a reavaliar a utilização desse solvente.

O etanol tem ganhado espaço como solvente, pois trata-se de uma substância que é polar, biodegradável, não tóxico e possui grande potencial para a extração de óleo (TOMAZIN JUNIOR, 2008). Dessa forma, este se destaca como sendo uma boa alternativa para a substituição do hexano como solvente de extração sem perdas de rendimento.

Devido à alta produção nacional, a utilização do etanol como solvente para a extração de óleos se tornou atrativa (RODRIGUES, 2011). Além disso, apresenta baixo custo, disponibilidade e independe do mercado internacional.

Uma outra vantagem de se usar etanol para o processo de extração de óleos, é que o óleo obtido apresenta teores de ácidos graxos livres e fosfolipídios mais baixos, pois esses se deslocam para a fase álcool durante o resfriamento do extrato. Além de que, o farelo obtido possui uma coloração clara e um aroma melhorado quando comparado ao obtido com hexano.

A destilação é um processo que utiliza o calor para separar os componentes de uma mistura homogênea com base na diferença de suas temperaturas de ebulição. Devido ao fato da energia solar ser uma fonte de energia limpa, abundante e inesgotável, sua utilização em diversos processos, como na destilação solar, desperta grande interesse e vem sendo objeto de diversos estudos atualmente. De acordo com Arslan (2012), o processo de destilação solar tem um futuro promissor, sendo esta uma fonte de energia limpa e abundante, sendo assim um método acessível a todos.

A destilação solar pode ser dividida como direta (passiva) e indireta (ativa). O sistema passivo recebe energia proveniente apenas do sol e já no caso da ativa, o sistema recebe além da radiação solar, uma parcela extra de calor advinda de outra fonte de energia (JORGE, 2011). Sabe-se que, em relação à produtividade, a destilação solar ativa possui vantagens com relação à passiva, porém do ponto de vista ambiental, a destilação passiva é mais favorável visto que utiliza apenas uma fonte de energia limpa, o sol (TIWARI *et al.* 2007).

Existem alguns parâmetros influentes na destilação solar, que Garg et al. (1976) cita sendo os parâmetros climáticos, como por exemplo, a radiação solar, a velocidade do vento, a temperatura do ambiente, as condições do céu e a umidade. Ainda de acordo com o autor, os ventos aumentam a produtividade do destilador, elevando a taxa de condensação.

Além dos fatores climáticos, o design do destilador e sua disposição influenciam bastante na eficiência térmica do mesmo, bem como nos rendimentos. Outro fator importante na construção do destilador solar é o ângulo de inclinação da cobertura, já que a mesma interfere tanto na passagem dos raios solares, quanto como suporte para o escoamento do líquido a ser destilado. Comumente admite-se que a melhor inclinação para a cobertura é a soma da latitude local mais 15°.

A destilação solar é mais comumente utilizada no processo de destilação da água, porém mostra-se também eficiente na destilação do álcool. A implantação do Programa Nacional do Álcool incrementou a produção e utilização do etanol como fonte energética. Os processos de destilação convencionais têm sido largamente utilizados pelos grandes centros produtores. Em pequena escala, a nível das chamadas micro usinas de álcool (produção diária em torno de 120 litros de álcool), acredita-se que tais processos possam ser substituídos, com vantagens, pela destilação solar (ISMAIL, 1984).

A Figura 1 demonstra o esquema ilustrativo do funcionamento e dos princípios utilizados para a construção do destilador de água, o que são basicamente o mesmo para destilar etanol.

Figura 1: Funcionamento de um destilador tipo tanque raso

Fonte: Soares, 2004.

A destilação realizada em destilador solar do tipo tanque raso (*basin type*) é um processo bastante simplificado, semelhante ao processo natural. A radiação solar esquenta o líquido contido no tanque (ou cuba rasa de material específico) construído ou não com material escuro (a fim de reter calor). O líquido se vaporiza e o vapor se condensa na cobertura de vidro (que tem uma temperatura mais baixa). A lâmina de água destilada é então coletada em uma canaleta construída na parte interna lateral do destilador. A energia solar fica retida no equipamento devido ao vidro ter transparência alta. Quando o líquido evapora, as impurezas com menor poder de evaporação ficam retidas no fundo do equipamento. Ao manter a cobertura de vidro inclinada, evita-se o retorno das gotas do líquido para o tanque.

Os melhores materiais para a cobertura são os vidros temperado ou comum. Os plásticos não são tão apropriados porque podem gerar um efeito chamado de *wettable* - em que gotas de água não se fixam bem à cobertura e acabam por cair de volta no tanque (MALUF, 2005; COSTA, 2008).

Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar a destilação para a purificação de um solvente residual proveniente da extração de óleo de coco, o qual já foi removida a maior parte do óleo do extrato. Para tal, empregou-se um destilador solar do tipo tanque raso, com cobertura de vidro do tipo telhado de duas vertentes. Foi avaliado o efeito da massa inicial de solvente dentro do destilador sobre a taxa de destilado formada e a eficiência térmica do destilador. A partir destes dados, foi possível encontrar a espessura ótima que maximiza a produção de destilado, a fim de proceder testes com alimentação contínua no destilador.

2. METODOLOGIA**2.1 CONSTRUÇÃO DA UNIDADE DESTILADORA**

Baseado nas informações coletadas na revisão da literatura optou-se pela construção de um destilador do tipo tanque raso, constituído por uma cobertura de vidro tipo telhado duas vertentes. Seu interior possui um recipiente revestido por uma cobertura preta, no qual fica contida a mistura a ser destilada, canaletas em suas laterais inferiores e recipientes para a coleta do condensado.

Para construção do destilador, utilizou-se como base as medidas de um destilador construído por Faria *et.al.* (2015), porém de outra geometria. Primeiramente, realizou-se a confecção da cobertura de vidro no formato de um telhado, apresentada na Figura 2.

Figura 2: Cobertura do destilador: (a) Aspecto da cobertura e canaletas de alumínio; (b) representação esquemática e ângulo de inclinação

Fonte: Autores (2017).

Tal geometria foi escolhida devido à sua maior superfície de condensação, a fim de facilitar a passagem do vapor de álcool para o estado líquido. De acordo com a literatura, o melhor ângulo para a cobertura, a fim de maximizar a incidência solar é a latitude local mais 15°, logo, considerando a latitude da cidade de Uberaba 19° aproximadamente, o ângulo de inclinação da cobertura de vidro foi de 34°.

Toda a unidade experimental utilizada para os experimentos de destilação é composta por uma mesa de tampo quadrado de madeira, onde é apoiada uma bacia de alumínio coberta com tinta preta. Por cima da bacia, como um telhado, está a cobertura de vidro construída. Nas paredes da cobertura há canaletas de alumínio para a coleta do álcool condensado (Figura 2).

O líquido desce por mangueiras para dois recipientes de vidro graduados. As mangueiras foram coladas na saída das canaletas com cola de silicone.

Figura 3: Destilador solar construído: (a) Representação esquemática; (b) Unidade em operação.

Fonte: Autores (2017).

Entre a bacia e a mesa, foi colocado uma placa quadrada de isopor revestida com papel filme preto fosco. O interior da bacia foi pintado com tinta automotiva preta fosca. Nas bordas da cobertura de vidro, que ficava em contato com o isopor, foram coladas com cola silicone, tiras de borracha. Também para auxiliar na vedação do equipamento, amarrou-se elásticos em sua volta para pressionar a cobertura de vidro sobre a base de isopor como mostrado na Figura 3. A amostra utilizada para a destilação foi uma mistura de óleo e álcool de concentração 0,12%. Foram utilizados cinco termopares e um multímetro.

Nas duas extremidades do destilador por onde o álcool escoava, foram fixadas duas mangueiras de $\frac{1}{4}$ in de diâmetro. Na saída das mangueiras haviam recipientes de vidros graduados para a coleta do álcool condensado.

Foi empregada uma bacia de alumínio de dimensão 45x45x7 cm, que foi pintada em seu interior com tinta automotiva de cor preta fosca, a fim de uma melhor absorção da radiação solar. Apoiou-se a bacia em uma superfície de isopor revestido com papel filme fosco, para o auxílio na vedação. Encaixou-se a estrutura de vidro sobre a bacia e foi utilizada uma mesa de madeira como suporte para o destilador, a qual também possuía dois buracos em suas extremidades para a passagem das mangueiras.

2.2. PROCESSO DE DESTILAÇÃO

Com a construção da unidade experimental finalizada, foram feitos os experimentos de destilação empregando o destilador solar. Determinou-se três volumes de amostra para realizar o procedimento: 500, 750 e 1000 mL da mistura. Para cada volume, é possível calcular a espessura da película de líquido que preenche a bacia, através de sua área superficial. Os testes foram feitos com três volumes distintos com a finalidade de estudar a influência da espessura de líquido na eficiência da destilação.

O destilador foi montado em local devidamente apropriado, onde houvesse incidência de radiação solar durante a maior parte do transcorrer do experimento. Os experimentos foram realizados em dias com clima ameno e baixa nebulosidade no local de operação. A cada trinta minutos, media-se o volume de álcool coletado nos recipientes e as seguintes temperaturas: do ar dentro do destilador, do lado de dentro e do lado de fora da cobertura de vidro, da parede interior da bacia e do líquido dentro da bacia. As temperaturas foram medidas utilizando termopares tipo K conectados a um multímetro.

Os fatores meteorológicos como a velocidade do vento, dados de radiação solar e temperatura ambiente foram obtidos pelo site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), por meio da central meteorológica localizada na Unidade II do Campus Univerdecidade da UFTM, em Uberaba.

2.3. ASPECTOS QUANTITATIVOS DO PROCESSO DE DESTILAÇÃO

A fim de determinar a espessura de filme ótima que maximiza a eficiência do processo de destilação, calculou-se a espessura através da Equação 1:

$$e = \frac{V_{bacia}}{A} \quad (1)$$

Sendo e a espessura de líquido na bacia (cm), V_{bacia} o volume ainda disponível na bacia (m^3) e A é a área útil da bacia do destilador (m^2).

Um aspecto muito importante a ser analisado no destilador é sua eficiência, a qual expressa de acordo com a Equação 2, a relação entre a radiação solar incidente sobre o destilador e o calor transferido pela evaporação-condensação (DUFFIE; BECKMAN, 1991).

$$\eta = \frac{q_e}{A \cdot I} = \frac{m_p \cdot h_{vap}}{A \cdot I} \quad (2)$$

Em que η é a eficiência do destilador, q_e é a quantidade de calor transferida pelo processo de evaporação-condensação, m_p é a taxa de destilado produzido ($\text{Kg}\cdot\text{h}^{-1}$), h_{vap} é o calor latente de vaporização do líquido a ser destilado ($\text{Kcal}\cdot\text{Kg}^{-1}$) e I é a radiação solar incidente durante a operação ($\text{Kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$).

Também foi possível analisar a variação das temperaturas e velocidade do vento durante a operação, bem como suas influências na produtividade volumétrica P_v do destilador. Esta foi calculada pela Equação 3, na qual V é o volume de álcool coletado (mL).

$$P_v = \frac{V}{A} \quad (3)$$

A eficiência do destilador foi estimada utilizando a Equação 4.

$$\eta = \frac{m_p \cdot h_{vap}}{A \cdot I} \cdot 100 = \frac{P_m \cdot h_{vap}}{I} \cdot 100 \quad (4)$$

Em que P_m a produtividade mássica ($\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$). Para o cálculo da produtividade mássica, usou-se a densidade do álcool como sendo $0,79 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

2.4. DESTILAÇÃO POR ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA

Posterior a realização dos experimentos em batelada, os cálculos efetuados acerca da espessura ideal de líquido para o processo, permitiram determinar a espessura da lâmina de líquido em que a destilação é maximizada e a vazão que deve ser alimentada, de acordo com a área útil da bacia. Neste intuito, foi avaliada a performance do destilador frente a alimentação contínua realizada através de uma bomba peristáltica.

Foram feitos dois experimentos com duração de duas horas cada e efetuada a leitura das medidas de temperaturas a cada 10 minutos plotadas em gráfico. Também foram obtidas novas medidas para o rendimento global de coleta de destilado e novos valores para a eficiência térmica do destilador.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS NO PROCESSO DE DESTILAÇÃO

Durante a realização dos experimentos, mediu-se as temperaturas mais relevantes no processo, sendo elas: do líquido dentro da bacia, da parede interna da bacia, do ar dentro do

destilador e da parte interna e externa da cobertura de vidro. Para analisar a influência da velocidade do vento na variação das temperaturas medidas, foram obtidos os dados meteorológicos para cada hora na cidade de Uberaba através do site do INMET.

Todos os experimentos foram realizados durante as horas de maior incidência de radiação solar, tendo início às 10 horas e término quando o líquido presente na bacia se esgotasse. A variação dessas temperaturas medidas, da temperatura ambiente e da velocidade do vento em cada intervalo de tempo para cada experimento, podem ser observadas na Figura 4.

A velocidade do vento interfere nas temperaturas, pois, o vento, ao passar por uma superfície, troca calor com a mesma através do processo de convecção. Como é possível observar nos gráficos, quando a velocidade do vento aumenta, as temperaturas diminuem. Isso é favorável, pois uma menor temperatura na superfície da cobertura, favorece a condensação do álcool para recuperação. Porém, um grande aumento na velocidade do vento pode fazer com que a temperatura da bacia diminua, prejudicando o processo de evaporação.

Figura 4. Temperaturas medidas e dados obtidos no INMET para o experimento com volumes iniciais de: (a) 500 mL; (b) 750 mL; (c) 1000 mL.

Fonte: Autores (2017)

Outro fator que influencia na variação da produtividade do destilador, é a radiação solar. Dessa forma, estudou-se também a interferência da radiação na produtividade, como pode ser observado na Figura 5.

Através dos dados de produtividade volumétrica e radiação em função do tempo, fica evidente a influência direta da radiação solar na produtividade do destilador. A radiação solar atua como fonte energética para a processo, fazendo com que as temperaturas de operação se elevem, e, com isso, a produtividade.

Figura 5. Gráfico de produtividade *versus* radiação solar para o experimento com: (a) 500 mL; (b) 750 mL; (c) 1000 mL.

Fonte: Autores (2017)

3.2 ESTUDO DA ESPESSURA DE LÍQUIDO ÓTIMA PARA O PROCESSO

Um dos objetivos do presente trabalho foi a determinação da espessura de líquido ótima na bacia para uma melhor eficiência de recuperação do álcool. Assim, calculou-se a espessura do filme para cada intervalo de tempo. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Espessura de líquido no tempo para cada experimento.

Tempo (min)	1000 mL		750 mL		500 mL	
	V (mL)	Espessura (cm)	V (mL)	Espessura (cm)	V (mL)	Espessura (cm)
0	0	0,494	0	0,370	0	0,247
30	46	0,471	43	0,349	70	0,212
60	89	0,427	81	0,309	121	0,153
90	85	0,385	108	0,256	87	0,110
120	87	0,342	85	0,214	113	0,054
150	64	0,311	112	0,159	30	0,039
180	104	0,259	80	0,119		
210	71	0,224	63	0,088		
240	110	0,170	33	0,072		
270	77	0,132	8	0,068		
300	37	0,114				
330	23	0,102				

Fonte: Autores (2017)

É possível observar que para os intervalos de tempo em que houveram um maior volume coletado (valores em negrito), as espessuras de líquido para cada experimento ficaram bem próximas entre si, em torno de 0,16 cm. Dessa forma, pode-se concluir que a espessura de líquido na bacia que promove a maior taxa de evaporação é por volta de 0,16 cm, que equivale a 324 mL de mistura no interior da bacia.

3.3 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO DESTILADOR

Utilizando a Equação 4 (eficiência), calculou-se a eficiência em cada intervalo de tempo durante a operação do destilador. Esses valores podem ser observados na Tabela 2.

Também foi calculado o rendimento considerando que a quantidade de óleo processo através da razão de líquido final presente na mistura inicial é tão baixa que coletado e o inicial inserido na bacia (Tabela 3), pode ser desprezada.

Pelos valores das tabelas, observa-se que a eficiência do destilador em todos os experimentos, se mostrou baixa, sendo que o valor máximo foi de 26,86% no experimento 1. Consta-se em diversas referências que experimentos realizados na Índia mostraram valores de perdas comuns de um destilador solar. Tais perdas se devem à reflexão da radiação incidente no vidro (10%), convecção do vidro para o ambiente (12,2%), absorção no vidro (10%), radiação da cobertura de vidro para o ambiente (3,7%), condução da base do recipiente (16%) e outras perdas devido aos vazamentos de calor (9,7%) (McCracken 1985, *apud* Maluf, 2005). Dessa forma, pode-se esperar que a eficiência térmica de um destilador solar apresente valores baixos.

Tabela 2. Eficiência térmica para o experimento com V0= 500, 750 e 1000 mL.

V0=500 mL				
Tempo (min)	Radiação (kJ.m ⁻² .h ⁻¹)	Pv (mL.cm ⁻² .h ⁻¹)	Taxa (mL.min ⁻¹)	Eficiência Térmica (%)
60	2316	0,0943	3,183	26,86
120	2601	0,0988	3,33	25,05
180	2261	0,0148	0,50	4,32
V0=750 mL				
Tempo (min)	Radiação (kJ.m ⁻² .h ⁻¹)	Pv (mL.cm ⁻² .h ⁻¹)	Taxa (mL.min ⁻¹)	Eficiência Térmica (%)
60	2324	0,0612	2,07	17,38
120	2641	0,0953	3,22	23,80
180	2624	0,0948	3,20	23,83
240	1762	0,0474	1,60	17,75
V0=1000 mL				
Tempo (min)	Radiação (kJ.m ⁻² .h ⁻¹)	Pv (mL.cm ⁻² .h ⁻¹)	Taxa (mL.min ⁻¹)	Eficiência Térmica (%)
60	2322	0,067	2,25	18,94
120	2602	0,085	2,87	21,53
180	2541	0,083	2,80	21,54
240	2486	0,089	3,02	23,72
300	1925	0,056	1,90	19,29

Fonte: Autores (2017)

Tabela 3. Eficiências de separação obtidas para cada experimento

	Volume inicial (mL)	Volume final (mL)	Rendimento (%)
Experimento 1	500	421	84,20
Experimento 2	750	613	81,73
Experimento 3	1000	806	80,60

Fonte: Autores (2017)

Por outro lado, o destilador construído apresentou ótimos valores para a produtividade volumétrica e eficiência de separação, fornecendo valores de rendimento acima de 80%.

3.4. DESTILAÇÃO POR ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA

Os testes de destilação foram feitos nos dias 18 (Experimento 1) e 19 (Experimento 2) de dezembro de 2017, ambos tiveram início às 13:00 do horário de verão. As temperaturas relacionadas ao processo de destilação de modo contínuo são apresentadas nos gráficos da Figura 6.

Figura 6. Temperaturas medidas e dados obtidos no INMET para os experimentos de destilação por alimentação contínua: (a) Experimento 1; (b) Experimento 2.

Fonte: Autores (2017)

A Tabela 4 apresenta o volume total de destilado obtido nos dois experimentos. Embora os valores obtidos tenham-se mostrado menores do que o experimento em batelada, cujo rendimento alcançou um máximo de 84,2% de coleta, é importante ressaltar que os testes em regime contínuo foram realizados em tempo de operação bem menores do que o processo em batelada, na qual a duração chegou a uma média de quatro horas para destilar uma mesma quantidade aproximada de líquido.

Tabela 4. Rendimento global da destilação contínua.

	V inicial (mL)	V adicionado (mL)	V final (mL)	Rendimento (%)
Experimento 1	324	360	486	71,052
Experimento 2	324	360	517	75,585

Fonte: Autores (2017)

Por fim, os valores apresentados pela Tabela 5 para eficiência térmica do destilador operando com alimentação contínua aumentaram consideravelmente quando comparados aos valores obtidos para a destilação em batelada, cuja eficiência máxima alcançou 26,86%, o que permite interpretar que o controle da espessura de líquido ideal para o processo favorece a taxa de evaporação.

Tabela 5 – Eficiência térmica do destilador operando em regime contínuo.

	Taxa (mL·m ⁻¹)	Radiação média (kJ·m ⁻² ·h ⁻¹)	Pv média (mL·cm ⁻² ·h ⁻¹)	Eficiência (%)
Experimento 1	3,508	3460	0,104	34,530
Experimento 2	3,79	3200	0,112	44,226

Fonte: Autores (2017)

A produtividade média encontrada para o experimento em regime contínuo foi de 0,108 mL·cm⁻²·h⁻¹, enquanto para o experimento em batelada alcançou uma média de 0,0654 mL·cm⁻²·h⁻¹. Quanto às eficiências, embora os valores tenham alcançado números diferentes, os resultados encontrados ainda estão previstos de acordo com as literaturas visitadas (MCCRACKEN, 1985, apud MALUF, 2005; BEZERRA, 1998).

4. CONCLUSÕES

Foi possível concluir a partir dos bons valores de produtividade e eficiência de separação obtidos para o destilador de duas vertentes, que o uso de destiladores solares para a destilação de álcool é um processo eficiente.

O projeto e construção da unidade experimental do destilador solar de duas vertentes apresentou uma satisfatória eficiência de separação da mistura óleo-álcool, sendo possível recuperar grande parte do solvente utilizado anteriormente na extração de óleo, para reutilização em futuros processos.

Conclui-se através dos experimentos realizados, que a espessura de líquido na bacia que proporciona uma maior taxa de recuperação do álcool evaporado é em torno de 0,16 cm. A introdução de uma alimentação contínua no destilador, a fim de manter a espessura deste dentro da bacia sempre constante e próxima da ótima encontrada no presente trabalho, gerou bons resultados, uma vez que a maior eficiência encontrada foi de 44,23%, que se encontra dentro dos valores aceitos na literatura.

Dessa forma, todo o processo, incluindo a extração e a recuperação do solvente, se torna sustentável e de baixo custo. Vale ressaltar que a maioria dos trabalhos em que se utilizam destiladores solares é para a dessalinização da água, porém, o trabalho em questão mostra que este equipamento também é eficiente quando usado para a destilação da mistura óleo-álcool.

Alguns fatores poderiam auxiliar na maximização da eficiência do processo, como a modificação na forma de coleta do destilado. Retirar as canaletas e construir uma base em que

se encaixe a estrutura de vidro e a bacia, para que o álcool escoie diretamente para um único recipiente, visando diminuir as perdas na coleta.

Os dados da central meteorológica localizada dentro da própria instituição, consultados no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram de suma importância na validação dos dados experimentos, tendo sido estes corroborados nos testes realizados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFTM e à PROPPG da UFTM pelo apoio financeiro, à Rede Mineira de Química e ao PPGMQMG, e também ao CNPq e à Fapemig.

REFERÊNCIAS

ARSLAN, M. **Experimental investigation of still performance for different active solar still designs under closed cycle mode**. Desalination. v. 307, p. 9-19, 2012.

BEZERRA, A. M. **Aplicações Térmicas da Energia Solar**. Editora Universitária. Terceira Edição, João Pessoa, 1998.

COSTA, C. G. **Destilação solar: aplicação no tratamento de efluentes líquidos de laboratórios**. 2008. 63 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

CRUZ, C. E. M. **Dessalinização da água do mar através da energia solar – Caso de estudo: Salamansa-Cabo Verde**. Dissertação (Mestrado) Engenharia do Ambiente. Universidade do Algarve. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Faro, 2012-a.

CRUZ, M. R. **Extração do óleo da torta de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) com etanol para remoção de éster de forbol**. 2012. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012-b.

DUFFIE, J. A. e BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Process**. John Wiley & Sons, 2nd, New York, 1991.

FARIA, E. V.; ALVES, I. F. B.; ARAÚJO, B. S. A.; BONTEMPO, L. H. S.; LIMA, M. N.; OLIVEIRA, L. C. C. B. **Desenvolvimento e construção de um destilador solar para dessalinização de água salgada em diferentes concentrações de sais**. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 37 p., 2015, São Carlos. UFSCAR.

GARG, H. P., MANN H. S. **Effect of climatic, operational and design parameters on the year round performance of single-sloped and doublesloped solar still under Indian arid zone conditions**. Solar Energy, v. 18, p. 159-163, 1976.

ISMAIL, K. A. R; LIU, C. Y. PIMENTEL, J. R. **Destilador solar de álcool**. UNICAMP, Campinas, 1984.

JORGE, B. M. J. **Simulação de processos de destilação solar de água salgada**. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. 2011.

MALUF, A. P. **Destiladores solares no Brasil**. 2005. 38 f. Monografia. (Especialização em Fontes Alternativas de Energia) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2005.

MARINHO, F. J. L.; ROCHA, E. N.; SOUTO, E. A.; CRUZ, M. P.; TAVARES, A. C.; SANTOS, S. A.; MARCOVICZ, F. 2012. **Destilador solar destinado a fornecer água potável para as famílias de agricultores de base familiar**. Revista Brasileira de Agroecologia, 7(3): 53-60, 2012.

RAMOS, R. E. M. **Desenvolvimento de um sistema híbrido de destilação solar para tratamento de água produzida**. 2009. 95f. Monografia (Graduação em Engenharia Química) Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

RODRIGUES, C. E. C. **Utilização de solvente biorenovável nos processos de extração e desacidificação de óleos vegetais**. 2011. 171 f. Tese (Doutorado em equilíbrio de Fases e

Processos de Separação na Indústria de Alimentos) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2011.

SANTOS, R. P. **Evaporação solar de água produzida de petróleo**. 2008. Dissertação (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SOARES, C. **Tratamento de água unifamiliar através da destilação solar natural utilizando água salgada, salobra e doce contaminada**. 2004. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Florianópolis: UFSC, 2004.

SOUSA, M. A. S. B. **Study of solar distillation feasibility for treating of oilfield produced water**. 2010. 149 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

TIWARI, A. K., TIWARI, G. N. **Thermal Modeling Based on Solar Fraction and Experimental Study of the Annual and Seasonal Performance of a Single Slope Passive Solar Still**. Desalination, v. 207, p. 184204, 2007.

TOMAZIN JUNIOR, C. **Extração de óleo de soja com etanol e transesterificação etílica na miscela**. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, 2008.