

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21 - 25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE DO EFEITO TERMOSSIFÃO NO SISTEMA AUXILIAR DE SECAGEM SOLAR

Rafaela F. Brito, rafaelabritto07@gmail.com¹
Caroline N. Fonseca, carolnerisepuesc@gmail.com¹
Jorge H. Sales, jhosales@uesc.br¹
Geovana Lima, geovanapires1907@hotmail.com¹
Luiz Vinícius Soglia, lvmsoglia@hotmail.com¹

¹Universidade Estadual de Santa Cruz, Rod. Jorge Amado Km16, Ilhéus/BA

Resumo: Considerando secadores de grãos convencionais como a barcaça, em que parte do tempo de secagem, de trabalho e de custo é gasto com a recuperação da temperatura necessária à secagem do dia anterior, perdida na interrupção, este trabalho visa manter a continuidade do processo de secagem, sem interrupção à noite ou em dias sem sol/com chuva. Dessa forma, a pesquisa propõe-se ao estudo de um sistema que auxilie no processo de secagem e garanta a temperatura constante dentro do secador mediante a construção de um acumulador de calor. O acumulador (cilíndrico) de energia solar conta com uma tubulação que contém um óleo mineral que transporta energia em forma de calor, por efeito termossifão. Assim, há um fluido de óleo quente circulando no sistema. Com o uso de simuladores e programas computacionais foi possível descrever todo o sistema de circulação. Foram analisados os parâmetros geométricos referentes à altura entre o acumulador térmico (neste caso, constituído de cloreto de sódio) e os coletores solares para que fosse possível a criação do anel de circulação natural do fluido no caminho do sistema e obter-se matematicamente a relação de variação da pressão do óleo em relação à água (fluido que contém maior referencial teórico para este tipo de aplicação) em mesma proporção para a relação entre as alturas.

Palavras-chave: termossifão, acumulador de calor, energia, simulação

1. INTRODUÇÃO

Operações de desidratação ou secagem, assim como a dinâmica do movimento de umidade em um material biológico, são importantes passos na indústria química e de processamento de alimentos, como também no armazenamento e processamento de grãos e outros produtos biológicos (Lima, 2015). Considerando secadores de grãos convencionais como a barcaça, em que parte do tempo de secagem, de trabalho e de custo é gasto com a recuperação da temperatura necessária à secagem do dia anterior, perdida na interrupção, percebe-se a necessidade de um sistema que seja abastecido por uma fonte de calor ininterrupta, ou seja, um acumulador de calor que garanta a temperatura constante dentro do secador.

Mais de 90% dos sistemas de aquecimento solar no Brasil são sistemas termossifão, que oferecem ao consumidor baixo custo, eficiência e confiabilidade. Nesses sistemas a circulação que ocorre entre o reservatório térmico e os coletores, ocorre de maneira natural (sem acionamento de motores). O fluido se comporta como um autêntico veículo para levar calor da fonte quente até a fonte fria.

Nesse contexto, para a maximização do tempo de secagem, é proposta a construção de um sistema auxiliar, que armazene o calor do sol durante o dia, e em ocasiões onde não há incidência solar, e que quando acionado transfira o calor armazenado para as amêndoas. A circulação natural, efeito termossifão, ocorre quando, por incidência solar, sobre o coletor solar, provoca uma diferença de densidade entre o óleo frio e quente, o que implica no movimento do óleo e consequentemente pode vencer a energia potencial gravitacional. Assim, há um fluido de óleo quente circulando, que ocorre graças à variação de temperatura, consequentemente de densidade, viabilizado pelo sistema ilustrado na Fig1.

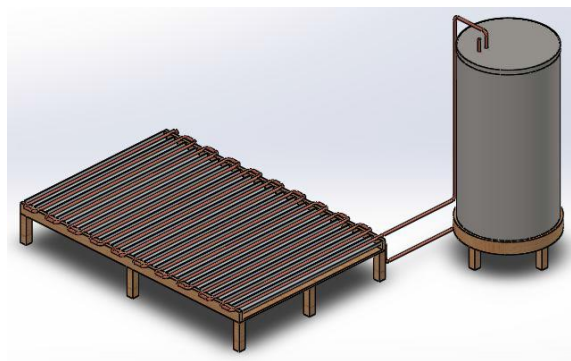


Figura 1. Sistema auxiliar com painel solar.

O sistema auxiliar (Figura 1) tem utilidade para “guardar” energia em forma de calor no cilindro. Este contém sal, que tem a capacidade de armazenar calor. O painel solar aquece uma serpentina que contém um óleo e sob efeito do termossifão, segue na direção do cilindro. Dentro do cilindro há duas serpentinas, uma para o óleo aquecido e uma para entrada do ar. Na serpentina que contém o óleo aquecido dentro do cilindro, acontece uma transferência de calor para o sal. Assim, o sistema com um todo acumula calor por esse processo, melhor descrito na seção 2.

2. SISTEMA AUXILIAR DE CALOR

A montagem proposta neste trabalho é a construção de um acumulador de calor que permitirá tornar ininterrupta a secagem de grãos tanto de dia, quanto de noite, quanto em dias de chuva, de pouco sol, ou nublado, fornecendo ar quente ao secador a ele acoplado, mantendo nele a temperatura a mais próxima possível de 50 °C, com um mínimo acionamento (motores) elétrico.

O gerador solar é constituído de coletores de raios solares espelhado em forma de calha (Sales,2011), de seção parabólica e de foco linear, ou seja, seu foco é distribuído ao longo de uma reta, onde passará a tubulação de um óleo mineral (soja). As calhas espelhadas devem ser montadas paralelas entre si, Fig. 2.

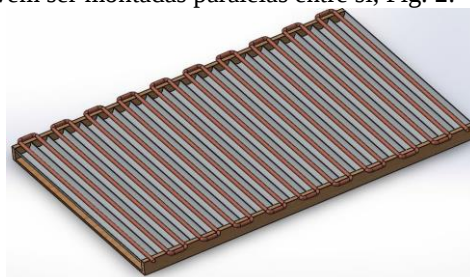


Figura 2. Painel solar

O outro componente do sistema é composto por um cilindro contendo sal (NaCl). Nesse sistema a escolha do sal como elemento acumulador de calor se deve ao seu elevado calor latente de fusão (capacidade de armazenagem de calor quatro vezes maior que a da água), elevado ponto de fusão (400°C), Fig.3.

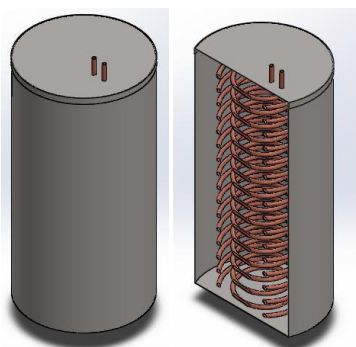


Figura 3. Reservatório térmico.

O sistema funciona com ajuda de um óleo que percorre todo o painel e sobe a uma altura h até topo do cilindro, Fig. 3, por efeito termossifão e volta por efeito gravitacional. Como não se conhece as propriedades desse efeito no óleo, neste artigo é obtida uma relação com o efeito termossifão da água.

No caso da água, se a temperatura de um corpo é reduzida, normalmente, provoca uma diminuição do seu volume, entretanto, a água possui um efeito anômalo. De 4 °C a 0 °C ela sofre um aumento de volume. Tal comportamento da água é conhecido como "dilatação anômala".

O estudo da dilatação térmica permite determinar a variação do volume com a temperatura. Considerando, por exemplo, o coeficiente de expansão térmica da água igual a $207 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, para um aumento de temperatura de 10°C, o aumento no volume da água é da ordem de 2 litros para cada mil litros de água (Cabral e Lago, 2002). Da mesma forma, com o mesmo aumento de temperatura (10°C), considerando o coeficiente de expansão térmica do óleo de soja predito, o aumento no volume de óleo de soja é da ordem de 7,5 litros para cada mil litros de óleo de soja. Ou seja, comparando a água com o óleo de soja, este apresenta uma maior dilatação volumétrica. A água apresenta menor dilatação volumétrica, pois apresenta como ligações intermoleculares pontes de hidrogênio, enquanto que os óleos vegetais, forças de Van der Waals (Usberco e Salvador, 1999).

Se uma instalação hidráulica com duas colunas de mesma altura, mesma densidade e pressão e fornecermos energia a uma delas, a água no interior da coluna começará a se aquecer e terá sua densidade diminuída. Como a pressão exercida é uma função da densidade, Eq.1, temos uma redução de pressão na coluna da água quente que é deslocada pela coluna da água fria com maior pressão.

$$p = \rho g \int_0^h dx \quad (1)$$

onde ρ é densidade do fluido em kg/m³, g a aceleração da gravidade (aproximadamente 9,8 m/s²) e h a altura da coluna em metros.

Se agora incluirmos um reservatório e fizermos um circuito fechado, o efeito causará um fluxo contínuo da água no sentido do reservatório para a coluna de água fria e depois para a coluna de água quente, onde a água aquecida é empurrada de volta ao reservatório. Eis então o princípio de funcionamento de um aquecedor solar por termossifão.

Estudos relatam que a diferença de pressão de 294 Pascal, o sistema operando em circuito termossifão, onde toda água no reservatório, na tubulação está a 20 °C e nos coletores a 40 °C, com densidades equivalentes a 998 e 983 kg/m³, respectivamente, conseguem atingir alturas de 2,0 a 3,0 metros. Percebe-se então que a força motriz do termossifão é pequena, mas suficiente para promover uma boa circulação em um sistema bem instalado.

2.1. Termossifão para o óleo

Nesta seção são avaliadas as condições em que o óleo isolante se comporta como um autêntico “veículo” para transportar o calor, por efeito de termossifão, desde uma fonte quente até uma fonte fria. Em sistemas onde o movimento do óleo em que as partes ativas estão mergulhadas e o movimento do ar ambiente, são movimentos naturais, criados pelo mecanismo da convecção espontânea. Não existem bombas hidráulicas para forçar o movimento do óleo, nem tão pouco ventiladoras para mover o ar.

A convecção natural baseia-se na variação física das massas volumétricas do óleo e do ar com a temperatura. Definimos desta maneira, no esquema termodinâmico da fonte quente e da fonte fria calculando a diferença entre as pressões exercidas no fundo pelas duas colunas líquidas. Tem-se

$$\Delta p = g(\rho_0 - \rho_1)h \quad (2)$$

onde g é a aceleração da gravidade, h a distância vertical entre os pontos médios das duas fontes, ρ_0 e ρ_1 são as densidades volumétrica do óleo nas temperaturas T_1 e T_0 .

Salvo raras exceções, toda substância se dilata com o aumento da temperatura. Com a dilatação, há uma alteração no volume, portanto uma alteração na densidade (uma vez que a massa não se altera). Dessa forma, sendo ΔV a variação de volume, temos a Eq. (3), dada em função da temperatura:

$$\Delta V = V_0 \gamma \Delta T \quad (3)$$

Se a temperatura de um corpo é reduzida, normalmente, provoca uma diminuição do seu volume, entretanto, a água é a mais comum das exceções. Observa-se que a densidade da água oscila muito pouco, e em torno de 20 °C é muito próxima de 1. Alguns dados evidenciam que a densidade máxima da água ocorre a 3,98 °C.

Tabela 1. Variação da densidade da água em função da temperatura.

Temperatura (°C)	Densidade (g/cm ³)
100	0,9584
80	0,9718
60	0,9832
22	0,9977
15	0,9991
10	0,9997
3,98	1,0000

*Valores considerados na pressão de 1 atm.

Percebe-se que dividindo a Eq. (3) pela massa m , é possível obter a relação inversa da definição de densidade, rearranjada na Eq. (4):

$$\Delta\rho = \frac{\rho_0}{\gamma\Delta T} \quad (4)$$

Como se trata de um sistema de circulação natural que ocorre da incidência de Sol sobre o coletor solar, a diferença de densidade entre o óleo frio e quente, provocada pelo calor absorvido do coletor, formará o anel de circulação do fluido no caminho do sistema. Desta forma, é importante para o funcionamento perfeito do sistema termossifão que sejam analisados os parâmetros relativos à altura entre o reservatório térmico e os coletores solares.

Interessados em calcular a distância vertical h para determinadas variações de pressão, consideramos a influência da densidade na dilatação volumétrica, Eq. (4), e chegamos à equação (5):

$$h = \frac{\gamma\Delta p\Delta T}{g\rho_0} \quad (5)$$

Uma relação para a altura h em um termossifão é encontrada, considerando o coeficiente de dilatação γ , a aceleração da gravidade g e a densidade inicial ρ_0 como constantes. Desta forma,

$$h = k\Delta p\Delta T \quad (6)$$

onde $k = \frac{\gamma}{g\rho_0}$, Δp é a variação da pressão e ΔT é a variação da temperatura.

A Eq. (2) juntamente com a definição de densidade deduzida em função da temperatura na Eq. (4), nos permite a análise da variação de pressão e da relação densidade x temperatura descrita na figura 4 para o óleo de soja e para a água.

$$g\Delta\rho_{\text{óleo}}h_{\text{óleo}} = g\Delta\rho_{\text{água}}h_{\text{água}} \quad (7)$$

Com o uso da Tab. 1, e considerando a tabela de dados experimentais (Cancian, 2008) para o óleo de soja, chegamos à determinação da relação entre as alturas relativas h entre a água e o óleo:

$$h_{\text{óleo}} \cong 0,67 \cdot h_{\text{água}} \quad (8)$$

A mesma relação é encontrada para as variações de pressão quando a altura é especificada em $h = 1$ m.

O efeito termossifão é usado pela relação (8) para que o óleo supere uma altura em relação ao solo em 0,67 relativa à altura que um sistema contendo água, usando o mesmo efeito físico do termossifão. Assim, pode-se usar esse transporte de óleo quente para dentro do acumulador de energia térmica.

2.2. Modelo Simulado

A abordagem para a simulação 2D do tanque de aço cilíndrico contendo duas serpentinas de cobre imersas em sal/salmoura foi feita a partir da utilização de um “modelo dos anéis” (Fig. 5) para representar cada uma das serpentinas. O tanque possui um eixo de simetria axial, permitindo que o sistema real em 3D (tanque, sal/salmoura e serpentinas) seja representado em um plano (2D) axial, gerando uma abordagem para a simulação conhecida como “simulação 2D axissimétrica”.

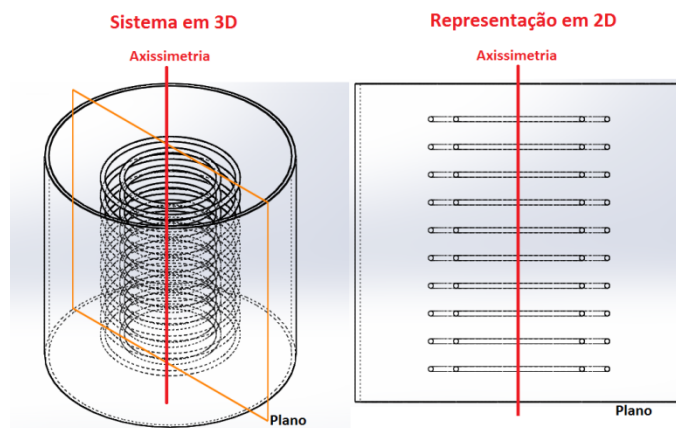


Figura 4 - Representação da abordagem de simulação 2D axissimétrica

Um “modelo de anéis” foi utilizado para representar as serpentinas, de forma a validar a abordagem em 2D axissimétrica para o problema do sistema auxiliar de aquecimento.

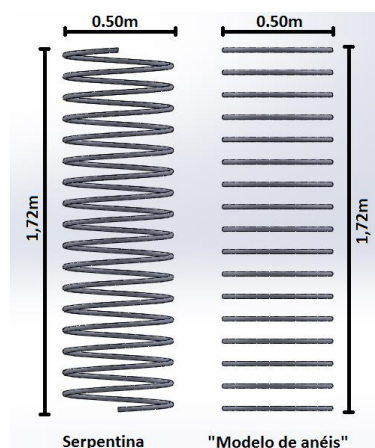


Fig. 5 - Comparação entre a serpentina e o modelo proposto com anéis.

Para fazer a validação desta consideração, pode-se observar a Fig. 5 e a Tabela 2.

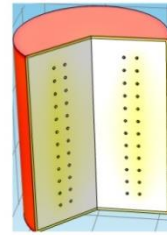
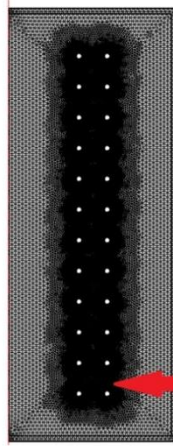
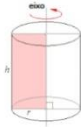
Tabela 2. Dados experimentais utilizados na comparação entre a serpentina e o modelo proposto com anéis.

SERPENTINA – MAIOR TAMANHO UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES	“MODELO DE ANÉIS” QUE REPRESENTA ESTA SERPENTINA
Altura = 1,72 m	Altura = 1,72 m
Número de revoluções: $n_{\text{revoluções}} = 17$	Número de anéis = 17
Altura do passo de cada revolução: $h_{\text{passo}} = 0,1 \text{ m}$	Altura entre os anéis = $h_{\text{passo}} + \frac{h_{\text{passo}}}{(n_{\text{revoluções}} - 1)} = 0,10625 \text{ m}$
Diâmetro da serpentina = 0,50 m	Diâmetro do anel = 0,50 m
Diâmetro da tubulação = 0,02 m (20 mm)	Diâmetro da tubulação = 0,02 m (20 mm)
Área superficial = 1,679161 m ²	Área superficial = 1,677833 m ²

A diferença entre as áreas superficiais (área de contato com o meio a ser aquecido) da serpentina e do “modelo de anéis” nas configurações da tabela acima é de $1,328 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ a menos no “modelo dos anéis”. Isso é equivalente a área de um quadrado de 3,65 cm de lado, sendo uma diferença irrelevante para a simulação.

Algumas condições de contorno, como espessura e trocas de calor convectivas e por condução das paredes do tanque, foram incluídas na simulação (Fig. 7). Todo funcionamento do sistema auxiliar, que permite que o ar quente acumulado seja conduzido à torre do secador, secando a carga de amêndoas dispostas em bandejas-rampas no seu caminho, é realizado pelo efeito termossifão. Este fenômeno só é possível devido às considerações de densidade na dilatação volumétrica que permite que os parâmetros geométricos sejam determinados adequadamente. A Figura 6 representa a malha usada no sistema cilíndrico.

Simulação do tanque 2D por Simetria Axial (o tanque cilíndrico é aproximado por um retângulo revolucionado em 360° de giro em torno do seu eixo central).



A malha gerada ficou bem densa em torno dos espaços que representam a serpentina (pois é onde há mais interações de troca de calor, dando maior precisão).

Figura 6. Malha de simulação do reservatório térmico

A Figura 7 mostra a simulação da concentração de energia térmica dentro do cilindro, onde se observa um ponto de alta temperatura. Esse resultado ainda é analisado.

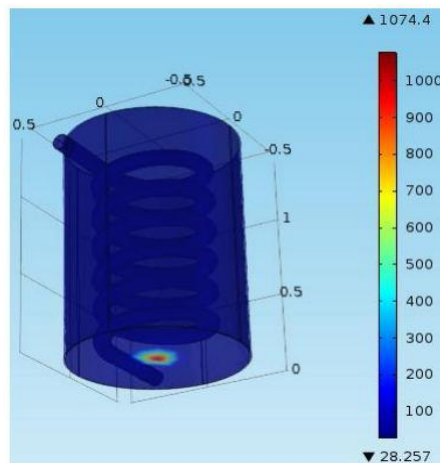


Figura 7. Campo de temperatura às 12 horas.

A serpentina interna servirá para que o óleo proveniente do sistema de aquecimento por espelhos flua por ação gravitacional e troque calor com NaCl, aquecendo-o. A variação de temperatura nesta serpentina interna, proveniente da perda de calor do óleo para o NaCl, foi representada inicialmente por uma função linear, onde a temperatura de entrada do óleo no topo da serpentina é de 70 °C e vai diminuindo de acordo com a sua descida (declive no eixo z da serpentina).

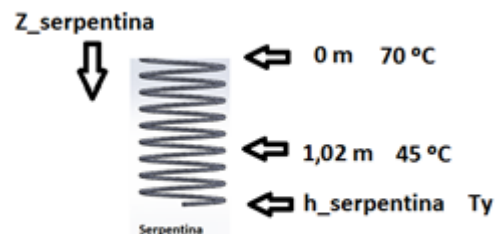
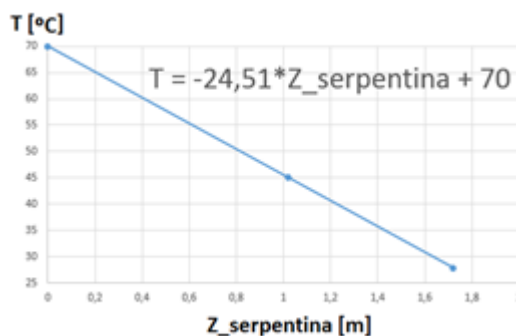


Figura 8. Relação temperatura versus altura da serpentina

No qual 1,02m é a altura da menor serpentina utilizada dentre as quatro configurações testadas e 1,72m a altura da maior serpentina. Assim todas as configurações seguirão a mesma distribuição linear de temperatura na serpentina durante o aquecimento.

2.2.1 Simulações utilizando o efeito termossifão

Da Eq. (8) é conectado o efeito termossifão da água com óleo. Assim, simulamos o aquecimento dentro do tanque com as dimensões especificadas a seguir:

- Altura do tanque = 1,50 m
- Diâmetro do tanque = 1,1546 m
- Volume do tanque = 1.570523 m³
- Número de anéis (equivalente ao n° de revoluções da serpentina) = 12

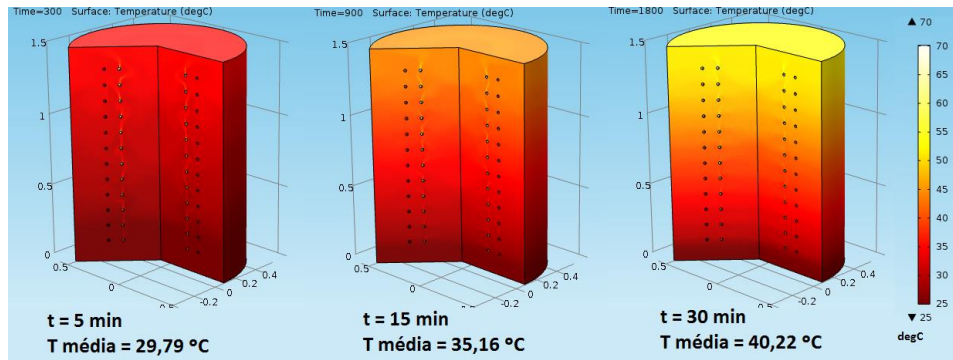


Fig. 9 - Aquecimento do tanque ao longo do tempo.

onde T média representa a média de temperatura no sistema.

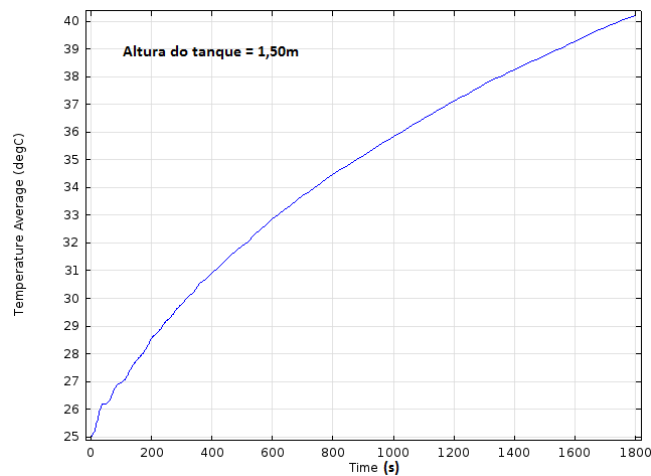


Fig. 10 - Temperatura média do tanque x tempo para o tanque com altura de 1,50m

O tanque de altura $h = 1,50 \text{ m}$, entre as configurações testadas, obteve o melhor resultado, apesar de a diferença ser relativamente baixa. Isso se deve a relação entre a área de contato do fluido com a serpentina e a perda de calor através da superfície do tanque. Tanques mais altos conseguem abrigar mais voltas de serpentina, logo há uma maior área de troca de calor entre a serpentina e o fluido do tanque.

3. CONCLUSÕES

Todo funcionamento do sistema é realizado pelo efeito termossifão que permite ao óleo quente subir, e através da gravidade o óleo desce e retorna para a placa aquecedora, o óleo quente quando passa pelo cilindro transfere o calor para o sistema cilíndrico contendo NaCl, que é acumulado para ser liberado quando a incidência solar for insuficiente para aquecimento de secador solar.

As relações encontradas geometricamente do sistema cilíndrico associado ao efeito termossifão, se constituem em um importante dimensionamento do conjunto cilindro-placa solar. Evitando assim, um colapso do sistema para altas temperaturas. Dessa forma, pode-se afirmar que existe uma alternativa viável e mais sustentável ao atual método de secagem de grãos.

4. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, FAPESB e a UESC pelas bolsas de iniciação científica.

5. REFERÊNCIAS

- Cabral, F. e Lago, A. “Física”, 2002, Vol. 1, Editora Harbra, São Paulo, Brasil.
- Canciam, C. A, 2008, “Predição do Coeficiente de Expansão Térmica do Óleo de Soja”, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa, Coordenação de Alimentos.
- Guerra, F., 1981, “Transformadores em Banho de Óleo. Arrefecimento por Termossifão”, Electricidade 159, pp. 4487-494.
- Lima, G. P.; Sales, Jorge Henrique . Alternative System for Klin Cocoa and Energy Generation. Revista GEINTEC: gestão, inovação e tecnologias, v. 5, p. 1703-1715, 2015.
- Sales, J. H. O. e G. W. L.N. Filho . Constant Thermal for Solar Panels and Their Structural Properties. Encontro de Física 2011, Foz do Iguaçu-PR, (2011).
- Usberco e Salvador, 1999, “Química”, Vol. Único, Editora Saraiva, São Paulo, Brasil.

6. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

EFFECT THERMOSIPHON ANALYSIS IN THE AUXILIARY SYSTEM SOLAR DRYING

Rafaela F. Brito, rafaelabritto07@gmail.com¹
Caroline N. Fonseca, carolnerisepuesc@gmail.com¹
Jorge H. Sales, [jhosaes@uesc.br](mailto:jhosales@uesc.br)¹
Geovana Lima, geovanapires1907@hotmail.com¹
Luiz Vinícius Soglia, lvmsoglia@hotmail.com¹

¹Universidade Estadual de Santa Cruz, Rod. Jorge Amado Km16, Ilhéus/BA

Abstract. Whereas dryers of conventional grains as the barge, in which part of the drying time, labor and cost is spent on the recovery temperature necessary for drying the previous day, lost in the interruption, this study aims to maintain the continuity of the drying process without interruption at night or on days without sun / rain. Thus, research proposes a study for a system that helps in the drying process and to ensure a constant temperature inside the dryer through the construction of a heat accumulator. The battery (cylindrical) of solar energy has a pipe containing a mineral oil that carries energy as heat, thermosyphon effect. Thus, there is a hot oil circulating fluid in the system. With the use of simulators and computer programs it was possible to describe the entire circulation system. the geometrical parameters relating to the height of the heat accumulator were analyzed (in this case consisting of sodium chloride) and the solar collectors so that it was possible to create natural movement of ring fluid in the system's path and obtain mathematically the relationship the variation relative to the oil water pressure (the fluid containing the theoretical framework for this type of application) in proportion to the ratio of the heights.

Keywords: Thermosiphon, heat accumulator, energy, simulation