

# SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE DESTILAÇÃO SOLAR PASSIVA COM SISTEMA REGENERATIVO

Érica Victor de Faria – erica-victor@hotmail.com

Nádia Guimarães Sousa – nadiagsousa@gmail.com

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Química

**Resumo.** O consumo de água potável é uma das necessidades básicas para a sobrevivência e desenvolvimento econômico do ser humano. Apesar disso, atualmente, uma significativa parcela da população mundial sofre com a escassez de água, incluindo grandes cidades que se mantêm de água provinda de processos de dessalinização. Contudo, grande parte destas técnicas é promovida pelo uso de combustíveis fósseis e eletricidade. Neste contexto, a energia solar como fonte energética ganha forte destaque por representar uma das fontes não poluente e inesgotável da Terra. Nessa vertente, o objetivo do presente trabalho é o estudo de um sistema de destilação solar passiva com sistema regenerativo, técnica que visa à obtenção de água potável através de águas contaminadas, e a influência de parâmetros importantes no processo. Esse estudo foi realizado a partir de simulação computacional do processo de destilação solar passiva com sistema regenerativo e de análise estatística considerando como ferramentas o planejamento composto central e superfícies de respostas. Verificou-se que a variável mais influente é a vazão da água de arrefecimento, seguido por espessura do isolamento, massa d'água na bacia e velocidade do vento, respectivamente.

**Palavras-chave:** Destilação Solar, Planejamento Composto Central, Sistema Regenerativo.

## 1. INTRODUÇÃO

Uma das necessidades básicas para a sobrevivência do ser humano é a ingestão de água de qualidade adequada e em quantidade suficiente para atender todas as suas necessidades, não só na manutenção da saúde, como também para o desenvolvimento econômico e social. No entanto o consumo de água doce no mundo aumenta a um ritmo superior ao crescimento da população. Segundo dados da Organização das Nações Unidas (ONU) (2000), enquanto a população atual do mundo (seis bilhões de habitantes) duplicou na última década, a demanda total de água cresceu seis vezes.

Diante deste problema, se tornou evidente a necessidade de novas estratégias economicamente viáveis para que águas marítimas e salobras também possam ser aproveitadas, de forma saudável, no consumo humano. Neste contexto, o desenvolvimento de dessalinizadores, tecnologia que consiste no processo de separação dos sais presentes, permite o consumo dessa maior parcela de água. Atualmente muitas cidades já se abastecem totalmente de água doce extraída da água do mar, porém os sistemas atuais de dessalinização consomem muita energia, sendo ineficazes em países pobres.

Uma opção interessante do ponto de vista ecológico e econômico é a destilação solar, pois utiliza uma fonte de energia gratuita e abundante, radiação solar. A destilação solar é uma tecnologia de fácil operação, não poluente e eficaz no tratamento de águas, sendo, uma solução integrada para escassez de água e problemas energéticos e ambientais.

Apesar das tantas vantagens essa tecnologia apresenta algumas limitações, em especial o alto custo, a baixa produtividade e eficiência energética, o que leva à ocupação de extensas áreas para se obter um grande volume de água destilada. No entanto, possui grande potencial para ser utilizada no abastecimento de pequenas comunidades que não tenham fácil acesso à água potável, não dispõem de energia elétrica ou cujo seu custo ainda seja muito elevado.

O uso da energia solar para a obtenção de água potável vem sendo estudado por diferentes autores. Em 1961 foram publicados dois importantes trabalhos na área de destilação solar o de Dunkle (1961) sobre destiladores solares simples e de múltiplo efeito e o trabalho de Lof *et al.* (1961) sobre balanço de energia em destiladores solares. A fim de propor uma comparação entre alguns tipos de destilação solar, Jorge (2011) estudou quatro tipos de instalações, testando a sensibilidade dessas estruturas à variação de alguns parâmetros. Hamadou (2014) estudou a modelagem e simulação de um sistema de destilação solar ativa com uso de um fluido de aquecimento abaixo da bacia d'água.

Contudo, conhecendo a situação de racionamento energético e a preocupação com os níveis da poluição mundial aliado à disposição da tecnologia dos simuladores computacionais de processos, o objetivo geral do trabalho é estudar a influência de variáveis relevantes no processo de destilação solar passiva com sistema regenerativo pela investigação de seu modelo dinâmico. As variáveis estudadas são a velocidade do vento, espessura do isolamento, massa de água na bacia e vazão da água de arrefecimento.

## 2. O PROCESSO DE DESTILAÇÃO SOLAR

O processo de destilação solar consiste basicamente em um tanque raso com um tampo de vidro transparente, formando um volume estanque no qual a radiação solar que atravessa a cobertura transparente e é absorvida pela água e pelo revestimento da bacia. Esta energia promove o aquecimento da água fazendo com que parte dela evapore,

condensando na sua superfície da cobertura; as gotículas condensadas deslizam até serem coletadas pelas canaletas, deixando para trás sais, minerais e a maioria das impurezas, incluindo microrganismos nocivos à saúde (Maluf, 2005).

Neste trabalho, será estudado um sistema destilação solar direta passiva com sistema regenerativo, mostrado na Fig. 1. É um destilador direto, pois usa a energia solar diretamente na destilação, não envolvendo outros tipos de coletores como nos sistemas indiretos. É passivo, pois a única fonte de energia é a radiação solar, não sendo acoplados outros métodos de fornecimento de energia, como é realizado nos destiladores solares ativos. Segundo Tiwari e Tiwari (2007), a destilação solar passiva é a solução economicamente mais recomendada para fornecimento de água potável, devido ao seu baixo custo em âmbito familiar.

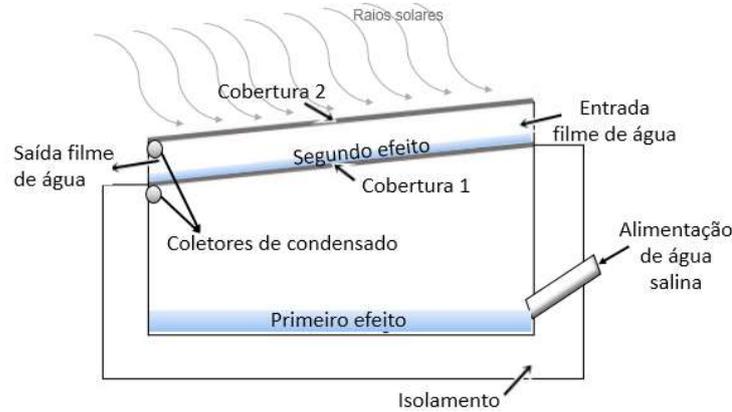


Figura 1 – Destilador solar com sistema regenerativo. Fonte: Adaptado de Zurigat; Abu-Arabi (2004).

O destilador solar com sistema regenerativo é uma nova configuração que visa melhorar o desempenho de destiladores simples compostos somente pela cobertura transparente, bacia de água a destilar e coletores de destilado na extremidade inferior da cobertura. No sistema estudado, um filme de arrefecimento, água salina à temperatura ambiente, flui sobre a cobertura com o propósito de diminuir sua temperatura. Essa diminuição ocasiona um incremento de produtividade, uma vez que, o aumento do gradiente de temperatura entre a cobertura e a bacia provoca um acréscimo na transferência de calor convectiva e evaporativa entre a bacia e a cobertura devido a um aumento da circulação natural da massa de ar no interior da unidade (JORGE, 2011). A água de arrefecimento recebe o calor latente de condensação e o evaporado é coletado pela segunda cobertura transparente sobre o filme de água. Com isso, além de aumentar a produção de destilado através do aumento da diferença entre temperatura água-cobertura 1, primeiro efeito, ainda, o filme de água gera destilado ao evaporar e ser coletado na segunda cobertura de vidro, segundo efeito.

### 3. METODOLOGIA

O modelo adotado para a simulação do destilador solar com sistema regenerativo, Fig. 1, é baseado nos trabalhos de Abu-Arabi et al. (2002) e Zurigat e Abu-Arabi (2004). O modelo é composto por balanços de energia individuais para cada componente do destilador. O balanço de energia para a temperatura da base, ( $T_b [K]$ ), é dado pela Eq. (1).

$$m_b C_{pb} \frac{dT_b}{dt} = I A_b - q_{c,b-w} - q_{loss} \quad (1)$$

Em que:  $m_b$  é a massa da base [ $kg m^{-2}$ ],  $C_{pb}$  é calor específico da base [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ],  $t$  é o tempo [s],  $I$  é fluxo de radiação solar [ $W m^{-2}$ ],  $A_b$  é a absorvância da base [-],  $q_{c,b-w}$  é o calor transmitido por convecção natural [ $W m^{-2}$ ] e  $q_{loss}$  é o calor perdido [ $W m^{-2}$ ] dado na Eq. (7). O balanço de energia para a temperatura da água da bacia, ( $T_w [K]$ ), é dado pela Eq. (2).

$$m_w C_{pw} \frac{dT_w}{dt} = I A_w + q_{c,b-w} - q_{r,w-g} - q_{c,w-g} - q_{evap,w-g} \quad (2)$$

Em que:  $m_w$  é a massa de água na bacia [ $kg m^{-2}$ ],  $C_{pw}$  é o calor específico da água da bacia [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ],  $A_w$  é a absorvância da água da bacia [-] e  $q_{r,w-g}$ ,  $q_{c,w-g}$  e  $q_{evap,w-g}$  são, respectivamente, o calor transmitido por radiação, convecção e evaporação da água da bacia para a cobertura 1 [ $W m^{-2}$ ]. O balanço de energia para a temperatura da cobertura 1, ( $T_{g1} [K]$ ), é dado pela Eq. (3).

$$m_g C_{pg} \frac{dT_{g1}}{dt} = I A_{g1} + q_{r,w-g1} + q_{c,w-g1} + q_{evap,w-g1} - q_{c,g1-wf} \quad (3)$$

Em que:  $m_g$  é a massa da cobertura de vidro [ $kg m^{-2}$ ],  $C_{pg}$  é o calor específico do vidro [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ],  $A_{g1}$  é a absorvância da cobertura 1 [-],  $q_{c,g1-wf}$  é o calor transferido por condução do filme de água para a cobertura 1 [ $W m^{-2}$ ]. O balanço de energia para a temperatura do filme de arrefecimento ( $T_{wf} [K]$ ), é dado pela Eq. (4).

$$m_{wf} C_{p_{wf}} \frac{dT_{wf}}{dt} = I A_{wf} + q_{c,g1-wf} - \dot{m}_{wf} C_{p_{wf}} (T_{wf} - T_{wf,in}) - q_{c,wf-g2} - q_{r,wf-g2} - q_{evp,wf-g2} \quad (4)$$

Em que:  $m_{wf}$  é a massa do filme [ $kg\ m^{-2}$ ],  $C_{p_{wf}}$  é calor específico da água do filme [ $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ ],  $A_{wf}$  é absorvância da água do filme [-] e  $\dot{m}_{wf}$  é a vazão do filme de arrefecimento [ $kg\ s^{-1}$ ],  $q_{c,wf-g2}$ ,  $q_{r,wf-g2}$  e  $q_{evap,wf-g2}$  são, respectivamente, calor transmitido por convecção, radiação e evaporação da água do filme para a cobertura 2 [ $W\ m^{-2}$ ].  $T_{wf,in}$  é a temperatura da água do filme na entrada [K]. O balanço de energia para a temperatura da cobertura 2, ( $T_{g2}/K$ ), é dado pela Eq. (5).

$$m_g C_{pg} \frac{dT_{g2}}{dt} = I A_{g2} + q_{r,wf-g} + q_{c,wf-g2} + q_{evap,wf-g2} - q_{r,g2-a} - q_{c,g2-a} \quad (5)$$

Em que:  $A_{g2}$  é a absorvância da cobertura 2 [-],  $q_{r,g2-a}$  e  $q_{c,g2-a}$  são, respectivamente, o calor transferido por radiação e convecção cobertura 2 para o ambiente [ $W\ m^{-2}$ ]. A produção diária de destilado por área de destilador, ( $m_c [kg\ m^{-2}]$ ), é calculada pela Eq. (6).

$$\frac{dm_c}{dt} = h_{evap,w-g1} \frac{(T_w - T_{g1})}{L_{T_w}} + h_{evap,wf-g2} \frac{(T_{wf} - T_{g2})}{L_{T_{wf}}} \quad (6)$$

Em que:  $h_{evap,w-g1}$  e  $h_{evap,wf-g2}$  são, respectivamente, o coeficiente de transferência de calor evaporativa da água da bacia para a cobertura 1, Eq. (14) e do filme de arrefecimento para a cobertura 2, Eq. (21), [ $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ ],  $L_{T_w}$  e  $L_{T_{wf}}$  são, respectivamente, o calor latente de evaporação da água da bacia e da água do filme de arrefecimento [ $J\ kg^{-1}$ ]. A absorvância de cada componente do sistema é dada por Zurigat e Abu-Arabi (2004). O coeficiente de convecção natural,  $h_{c,b-w}$  [ $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ ], é dado por Incropera e Dewitt (2014) e o coeficiente de transferência de calor para as perdas  $h_b$  [ $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ ] é dado pela Eq. (8), adaptado de Jorge (2011), em que:  $h_{c,g-a}$  é o coeficiente de transferência de calor convectiva da cobertura para atmosfera [ $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ ] e  $U_b$  é o coeficiente global de transferência de calor [ $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ ].

$$q_{loss} = h_b (T_b - T_a) \quad (7)$$

$$h_b = \left( \frac{k_{isol}}{x_{isol}} + \frac{1}{h_{c,g-a}} \right)^{-1} + U_b \quad (8)$$

A Eq. (9) apresenta o calor transferido por radiação da água para a cobertura 1, sendo  $h_{r,w-g1}$  o coeficiente de transferência de calor radiativo da água para a cobertura 1 [ $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ ], dado pela Eq. (10).

$$q_{r,w-g1} = h_{r,w-g1} (T_w - T_{g1}) \quad (9)$$

$$h_{r,w-g1} = \varepsilon_{eff} \sigma (T_w^2 + T_{g1}^2) (T_w - T_{g1}) \quad (10)$$

Sendo  $\sigma$  é a constante de Stefan - Boltzmann [ $W\ m^{-2}\ K^{-4}$ ], e  $\varepsilon_{eff}$  é a emissividade efetiva [-], dada por Jorge (2011). A transferência de calor convectiva da água para a cobertura 1 é dada pela Eq. (11), sendo  $h_{c,w-g1}$  o coeficiente de transferência de calor convectivo da água para a cobertura 1 ( $h_{c,w-g1}$  [ $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ ]), dado pela Eq. (12).

$$q_{c,w-g1} = h_{c,w-g1} (T_w - T_{g1}) \quad (11)$$

$$h_{c,w-g1} = 0,884 \left[ T_w - T_{g1} + \frac{(P_w - P_{g1}) T_w}{268,9 \times 10^3 - P_w} \right]^{1/3} \quad (12)$$

Os termos  $P_w$  e  $P_{g1}$  representam, respectivamente, a pressão de vapor da água da bacia e da cobertura 1 [Pa]. O calor de evaporação para o primeiro efeito é dado pela Eq. (13), em que  $h_{evap,w-g1}$  é o coeficiente de transferência de calor evaporativo da água para a cobertura 1 [ $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ ], expresso pela Eq. (14).

$$q_{evap,w-g1} = h_{evap,w-g1} (T_w - T_{g1}) \quad (13)$$

$$h_{evap,w-g1} = 16,273 \times 10^{-3} h_{c,w-g1} \frac{(P_w - P_{g1})}{(T_w - T_{g1})} \quad (14)$$

A Eq. (15) expõe o calor transferido por condução do filme d'água para a cobertura 1, sendo  $h_{c,g1-wf}$  o coeficiente condutivo de transferência de calor do filme de água para a cobertura 1 [ $W\ m^{-2}\ K^{-1}$ ], dado por Malik *et al.* (1982).

$$q_{c,g1-wf} = h_{c,g1-wf} (T_{g1} - T_{wf}) \quad (15)$$

O calor transferido do filme de água para a cobertura 2 é dado pela parcela convectiva, radiativa e transferida pela evaporação. A parcela convectiva é dada pela Eq. (16).

$$q_{c,wf-g2} = h_{c,wf-g2}(T_{wf} - T_{g2}) \quad (16)$$

Sendo  $h_{c,wf-g2}$  o coeficiente de transferência de calor do filme para a cobertura 2 [ $W m^{-2} K^{-1}$ ], dado pela Eq. (17).

$$h_{c,wf-g2} = 0,884 \left[ T_{wf} - T_{g2} + \frac{(P_{wf} - P_{g2})T_{wf}}{268,9 \times 10^3 - P_{wf}} \right]^{1/3} \quad (17)$$

A parcela radiativa do calor transferido do filme de água para a cobertura 2 é expressa pela Eq. (18).

$$q_{r,wf-g2} = h_{r,wf-g2}(T_{wf} - T_{g2}) \quad (18)$$

Sendo o  $h_{r,wf-g2}$  coeficiente de transferência de calor radiativo [ $W m^{-2} K^{-1}$ ] dado pela Eq. (19).

$$h_{r,wf-g2} = \varepsilon_{eff} \sigma (T_{wf}^2 + T_{g2}^2) (T_{wf} - T_{g2}) \quad (19)$$

A parcela transferida pelo calor de evaporação é dada pela Eq. (20) em que  $h_{evap,wf-g2}$  é o coeficiente de transferência de calor por evaporação da água do filme para a cobertura externa [ $W m^{-2} K^{-1}$ ], dado pela Eq. (21).

$$q_{evap,wf-g2} = h_{evap,wf-g2}(T_{wf} - T_{g2}) \quad (20)$$

$$h_{evap,wf-g2} = 16,273 \times 10^{-3} h_{c,wf-g2} \frac{(P_{wf} - P_{g2})}{(T_{wf} - T_{g2})} \quad (21)$$

O calor radiativo transferido da cobertura externa para o ambiente é mostrado na Eq. (22).

$$q_{r,g2-a} = h_{r,g2-a}(T_{g2} - T_{sky}) \quad (22)$$

Sendo  $T_{sky}$  a temperatura da atmosfera [K]. E  $h_{r,g2-a}$  coeficiente radiativo de transferência de calor da cobertura externa para o ambiente [ $W m^{-2} K^{-1}$ ] dado pela Eq. (23).

$$h_{r,g2-a} = \varepsilon_{eff} \sigma (T_{g2}^2 + T_{sky}^2) (T_{g2} + T_{sky}) \quad (23)$$

O calor transferido da cobertura externa ao ambiente por convecção é mostrado na Eq. (24).

$$q_{c,g2-a} = h_{c,g2-a}(T_{g2} - T_a) \quad (24)$$

O coeficiente condutivo ( $h_{c,g2-a}$  [ $W m^{-2} K^{-1}$ ]), é dado por Abu-Arabi et al. (2002).

## 2.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE ALGUMAS VARIÁVEIS SOBRE O PROCESSO

A fim de avaliar a influência de algumas variáveis sobre o desempenho do destilador solar passivo com sistema regenerativo, foi proposto a aplicação da técnica de planejamento composto central 4<sup>5</sup>, com quatro variáveis qualitativas e cinco níveis, para avaliar o efeito da velocidade do vento, massa de água na bacia, espessura de isolante e vazão da água de arrefecimento sobre o desempenho destes sistemas de destilação. A Tab. 1 apresenta a codificação das variáveis e as condições operacionais dos experimentos realizados estão dispostas na Tab. 3.

Tabela 1 – Codificação das variáveis.

Codificação	Variável	Nível				
		-2	-1	0	+1	+2
X <sub>1</sub>	Espessura de isolante [m]	0,000	0,025	0,050	0,075	0,100
X <sub>2</sub>	Velocidade do vento [m s <sup>-1</sup> ]	0,00	0,75	1,5	2,25	3,0
X <sub>3</sub>	Massa de água na bacia [kg]	5,0	15,0	25,0	35,0	45,0
X <sub>4</sub>	Vazão da água de arrefecimento [kg s <sup>-1</sup> ]	0,0015	0,0062	0,0133	0,0203	0,0250

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros de resolução do sistema encontram-se na Tab. 2. Dados de irradiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento, referentes ao mês de Janeiro/2015 para a cidade de Uberlândia - MG, foram obtidos no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2015). Foram adotadas condições meteorológicas para a cidade de Uberlândia, visto que não foi possível obter dados referentes a cidade de Uberaba-MG, local de realização do trabalho.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados nas simulações.

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
$\alpha_b$	0,950	$C_{pw}$	$4178 J kg^{-1} K^{-1}$
$\alpha_g$	0,048	$h_{c,b-w}$	$135 W m^{-2} K^{-1}$
$\alpha_w$	0,050	$k_{isol}$	0,080
$\varepsilon_g$	0,880	$k_w$	0,613
$\varepsilon_w$	0,960	$m_b$	$7,800 kg m^{-2}$
$\sigma$	$5,670 \cdot 10^4 W m^{-2} K^{-4}$	$m_g$	$5,400 kg m^{-2}$
$\rho_g$	0,074	$m_w$	$20,000 kg m^{-2}$
$u_w$	$1003 m^3 kg^{-1}$	$m_{wf}$	$2,000 kg m^{-2}$
$\mu$	$855 \cdot 10^6 kg m^{-1} s^{-1}$	$Pr_w$	5,830
$C_{pb}$	$473 J kg^{-1} K^{-1}$	$T_{wf,in}$	298,150 K
$C_{pg}$	$800 J kg^{-1} K^{-1}$	$U_b$	$14,000 W m^{-2} h^{-1}$

Com o intuito de avaliar o efeito de algumas variáveis sobre a produção de destilado, optou-se pela metodologia estatística utilizando planejamento composto central com duas réplicas no ponto central e a técnica de superfície de resposta. Foi realizada uma análise de regressão múltipla, sendo os parâmetros estimados por mínimos quadrados, com um nível de significância do teste de 5%. A análise de variância da regressão foi apresentada através do teste  $F$  e do coeficiente de correlação  $R^2$ . As simulações foram realizadas de acordo com o estipulado pelo planejamento composto central. Os resultados de produção de água obtidos para cada condição são apresentados na Tab. 3.

Tabela 3 – Planejamento Composto Central 4<sup>5</sup> com dois pontos centrais e massa de água destilada obtida.

Experimento	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	Massa de destilado [kg m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> ]
1	-1	-1	-1	-1	2,114
2	-1	-1	-1	1	2,470
3	-1	-1	+1	-1	2,377
4	-1	-1	+1	+1	2,502
5	-1	+1	-1	-1	2,271
6	-1	+1	-1	+1	2,602
7	-1	+1	+1	-1	2,602
8	-1	+1	+1	+1	2,682
9	+1	-1	-1	-1	1,951
10	+1	-1	-1	+1	2,337
11	+1	-1	+1	-1	2,191
12	+1	-1	+1	+1	2,366
13	+1	+1	-1	-1	2,089
14	+1	+1	-1	+1	2,458
15	+1	+1	+1	-1	2,389
16	+1	+1	+1	+1	2,529
17	-2	0	0	0	2,559
18	+2	0	0	0	2,249
19	0	-2	0	0	1,816
20	0	+2	0	0	2,518
21	0	0	-2	0	2,265
22	0	0	+2	0	2,552
23	0	0	0	-2	1,995
24	0	0	0	+2	2,599
25	0	0	0	0	2,439
26	0	0	0	0	2,439

Foi realizada a análise estatística para espessura de isolante, velocidade do vento, massa de água na bacia e velocidade do filme de arrefecimento assim como para a destilação solar passiva com dupla cobertura. A Tab. 4 apresenta os resultados da regressão para produção de destilado por dia. Pode-se observar que todas as variáveis exercem influência sobre a produção de destilado nesse sistema, sendo, respectivamente, a vazão do fluido de arrefecimento, espessura do isolante, massa de água na bacia e velocidade do vento. Para a espessura de isolante e massa de água na bacia foram obtidas conclusões similares às da destilação solar simples.

Tabela 4 – Efeitos das variáveis sobre a produção do destilador solar passivo com sistema regenerativo ( $R^2=0,937$ ).

Fator	Parâmetro	Desvio	Significância
<b>Média</b>	2,439217	0,060731	0,000000
<b>(X<sub>1</sub>) Espessura Isolante</b>	0,113194	0,017532	0,000006
<b>(X<sub>1</sub><sup>2</sup>) Espessura Isolante</b>	-0,059365	0,020558	0,010225
<b>(X<sub>2</sub>) Velocidade do Vento</b>	0,079925	0,017532	0,000278
<b>(X<sub>2</sub><sup>2</sup>) Velocidade do Vento</b>	0,001067	0,020558	0,959199
<b>(X<sub>3</sub>) Massa de Água na Bacia</b>	-0,080423	0,017532	0,000262
<b>(X<sub>3</sub><sup>2</sup>) Massa de Água na Bacia</b>	-0,000134	0,020558	0,994865
<b>(X<sub>4</sub>) Vazão água de Arrefecimento</b>	0,132095	0,017532	0,000001
<b>(X<sub>4</sub><sup>2</sup>) Vazão água de Arrefecimento</b>	-0,026944	0,020558	0,207404

Pode-se observar que a variável vazão da água de arrefecimento é a que exerce maior influência sobre o sistema, seguida da espessura de isolamento, massa de água na bacia e velocidade do vento, respectivamente. Na superfície de resposta da Fig. 2, é possível notar um comportamento parabólico ao variar a vazão de água de arrefecimento.

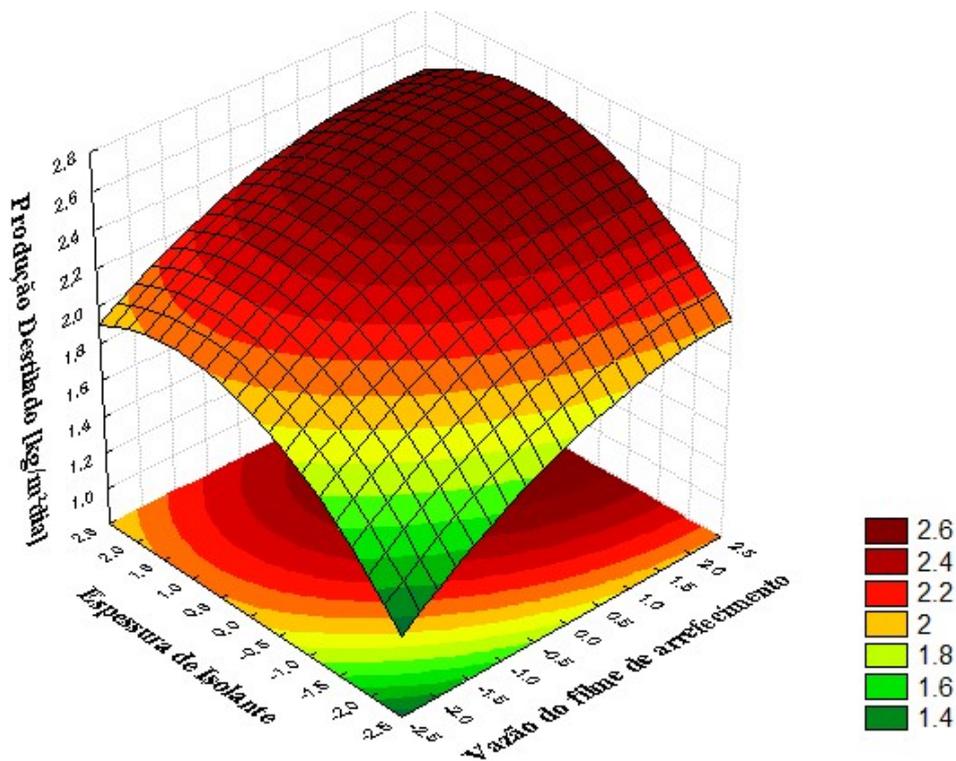


Figura 2 – Superfície de resposta para a produção de destilado em função da vazão do filme de arrefecimento e espessura de isolante (variáveis codificadas).

Tal comportamento pode ser explicado, pois, baixas vazões de água de arrefecimento permitem que o filme de água no segundo efeito do destilador alcance temperaturas maiores, aumentando sua capacidade de evaporação, ou seja, menores vazões de água de arrefecimento maximizam a produção de destilado no segundo efeito, isso pode ser comprovado analisando a Fig. 3. Esse resultado está de acordo com o trabalho de Zurigat e Abu-Arabi (2004). Em contrapartida, quanto maior a vazão do filme de água sobre a cobertura do destilador, maior é a troca térmica entre eles, mantendo, assim, a temperatura da cobertura baixa, aumentando o gradiente de temperatura entre água da bacia e a cobertura e por sua vez aumentando a produção de destilado no primeiro efeito do destilador, de acordo com a Fig. 4.

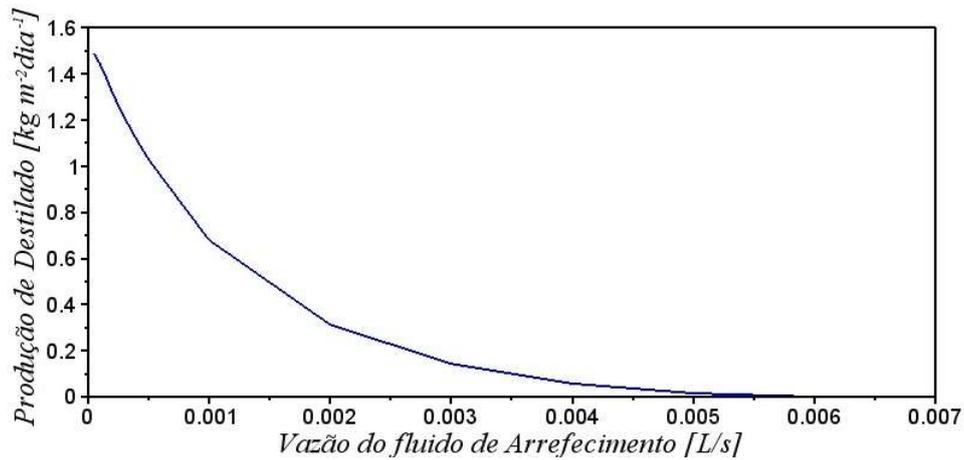


Figura 3 – Variação da produção do segundo efeito do destilador solar com sistema regenerativo pela vazão do filme de arrefecimento ( $x_{isol}=0,075$  m e  $M_w=25$  kg).

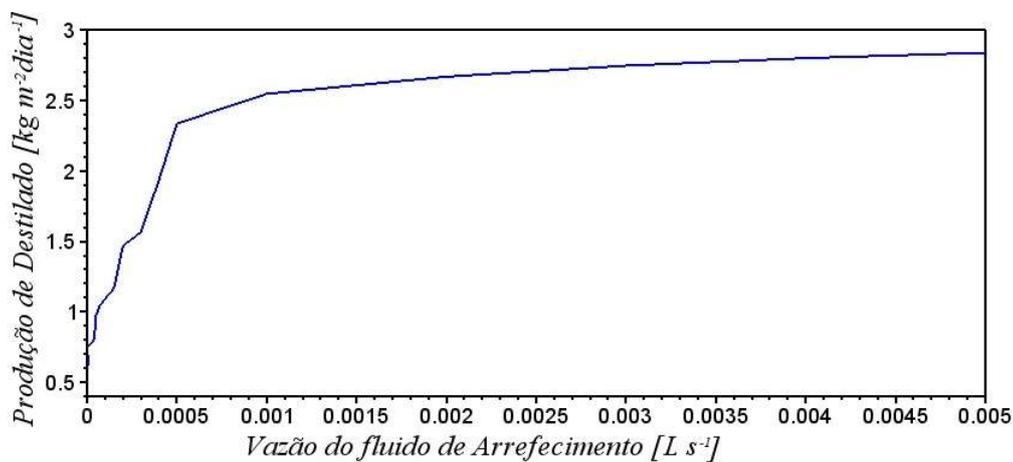


Figura 4 – Variação da produção do primeiro efeito do destilador solar com sistema regenerativo pela vazão do filme de arrefecimento ( $x_{isol}=0,075$  m e  $M_w=25$  kg).

Da mesma forma à variável anterior, maiores valores de produção de destilado são obtidos para os maiores valores de espessura de isolante. No entanto essa variável apresenta contribuição linear e quadrática, o sinal negativo do coeficiente quadrático sugere a possibilidade de se obter um ponto de máximo, dentro da faixa estudada para essa variável. Analisando a Fig. 2, fica claro a influência quadrática da espessura de material isolante na produção de destilado. A resposta aumenta linearmente com o aumento da espessura até um ponto de máximo a partir do qual a resposta passa a variar muito pouco com o aumento do nível, permanecendo quase constante. Com isto, pode-se inferir que a espessura de isolamento ótima é representada pelo nível 1 de planejamento, ou seja, 0,075 m de material isolante.

De acordo com o planejamento a massa de água na bacia é a terceira variável, em nível de significância sobre o processo. Ela tem influência linear e negativa, afetando o sistema de forma contrária às anteriores, como esperado, visto que, quanto menor a quantidade de água no interior do destilador menor a quantidade de calor necessária para promover sua evaporação, resultado condizente com Jorge (2011).

Também pode ser observada influência linear da velocidade do vento. O sinal positivo do coeficiente indica que para maiores valores de velocidade do vento se atinge maior produção de destilado, ou seja, em um sistema bem isolado na base e laterais, a velocidade do vento o afeta escoando sobre a cobertura externa (cobertura 2) do destilador, promovendo seu resfriamento. Com isso, aumenta-se a diferença de temperatura entre a cobertura e a água do filme favorecendo a condensação na cobertura, aumentando-se a produção de água destilada no segundo efeito.

#### 4. CONCLUSÃO

Pela análise estatística de planejamentos compostos centrais e superfícies de resposta foi possível perceber que a variável que exerce maior influência no processos de destilação passiva com sistema regenerativo é a espessura do isolamento térmico. Foi determinado uma espessura de isolamento ótima de 0,075 m de material isolante com condutividade térmica de  $0,080 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Também foi avaliada a relevância da velocidade do vento que se mostrou como uma variável muito influente no sistema de destilação visto que auxilia no arrefecimento da cobertura externa do destilador. A massa de água na bacia tem influência sobre a produção de destilado, visto que quanto menor a quantidade

de água a destilar, menor é a quantidade de calor necessário para que ocorra a evaporação e com isso maior é a quantidade de destilado produzido.

Além disso, constatou-se que sob altas vazões de água de arrefecimento há um resfriamento efetivo da temperatura da cobertura interna do destilador. No entanto para tais condições a produção de destilado no segundo efeito é minimizada. Já para baixas vazões de fluido de arrefecimento, não é realizado o resfriamento da cobertura interna do destilador, perdendo o intuito deste recurso.

De modo geral, pode-se dizer que os objetivos propostos no trabalho foram alcançados, uma vez que se conseguiu determinar a influência de parâmetros relevantes no processo de destilação solar passiva e chegar a resultados condizentes com autores da área.

Através dos resultados obtidos com este trabalho e os estudos realizados para tal, são propostos para trabalhos futuros: o estudo de outros sistemas de destilação solar passiva, como por exemplo, o destilador solar escada que aumenta a produção de destilado devido ao aumento da área de exposição solar da água da bacia, disposta na forma de degraus. O estudo de sistemas de destilação solar ativa e a comparação entre sistemas de destilação solar ativa e passiva, bem como avaliação da influência de parâmetros relevantes a estes sistemas sobre a produção de destilado.

## REFERÊNCIAS

- ABU-ARABI, M.; ZURIGAT Y.; AL-HINAIB H.; AL-HIDDABIB S. Modeling and performance analysis of a solar desalination unit with double-glass cover cooling. *Desalination* n° 143 p. 173-182, 2002.
- CEMIG – COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Alternativas Energéticas: Uma visão Cemig. Belo Horizonte, 2012.
- CRAVO, J. G.; CARDOSO, H. E. Projeto de dessalinização de solos e água. Nota Técnica n°1. Brasília/DF: SRH/MMA, 1996.
- DUNKLE, R. V. Solar water distillation: the roof type still and a multiple effect diffusion still. *International Development in Heat Transfer*. University of Colorado. n° 108 p. 895-902. 1961.
- HAMADOU, O.A.; KHAMLICHI A. Modeling an active solar still for sea water desalination process optimization. *Desalination* n° 354 p. 1-8, 2014.
- INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 5ª ed. *John Wiley and Sons*. 2002.
- INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em 20 maio 2015.
- JORGE, Bruno Miguel Jacinto: Simulação de Processos de Destilação Solar de Água Salgada. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. 2011.
- LOF, G. O. G., EIBLING, J. A., BLOEMER, J. M. Energy balances in Solar Distillers. *A. I.Ch.E. Journal*, vol. 7, n° 4, 641-649, 1961.
- MALIK, M., TIWARI, G., KUMAR, A., SODHA, M. Solar distillation. *Pergamon Press*. 1982.
- MALUF, A., P. Destiladores Solares no Brasil. 2005. 39 f. Monografia (Fontes Alternativas de Energia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.
- ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Classes de países em termos da oferta de água. New York, Relatório técnico, 2000.
- RAINHO, J. M. Planeta Água, Educação 221, v. 26, p. 48–64, setembro, 1999.
- 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: The Effect of Water Depths. *Desalination*, n° 207, p. 184-204, 2007.
- ZURIGAT, Y. H., ABU-ARABI, M. K. Modeling and Performance Analysis of a Regenerative Solar Desalination Unit. *Applied Thermal Engineering*, n° 24, p. 1061-1072. 2004.

## SIMULATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF A REGENERATIVE SOLAR DESALINATION SYSTEM

**Abstract.** *The consumption of drinking water is one of the basic human needs for survival and economic development. Nevertheless, nowadays, a significant part of the world population suffers from water scarcity, including major cities that are supported by water from desalination processes. However, many of these techniques are foster by the use of fossil fuels and electricity. In this context, solar power as an energy source gained strong prominence by representing one of the non-polluting and inexhaustible sources of the Earth. In respect to this subject, the purpose of this project is to study the regenerative solar still, which aims to obtain drinking water from contaminated water and important parameters in the process. This study was carry out from the simulation of processes and statistical analysis of experimental design and response surface. It was found that the most influencing variable is the flow rate of cooling water, then the thickness of the insulation, the water in the dough basin and wind velocity, respectively.*

**Key words:** *Solar Still. Central Composite Design. Regenerative System.*