

OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA E AUTOMATIZAÇÃO PARA UM PASTEURIZADOR COM CONCENTRADOR CILÍNDRICO-PARABÓLICO

Taciano Amaral Sorrentino (UFERSA) - taciano@ufersa.edu.br

Gustavo Krause Viera Garcia (UFERSA) - gustavo-krause@hotmail.com

Antonio Lucas Dos Santos Carlos (UFERSA) - lucas_-7@outlook.com

Neemias Dantas Fernandes (UFERSA) - neemiasdf@gmail.com

Resumo:

O consumo de água contaminada ainda é causa de adoecimento e mortes em muitas partes do mundo. A pasteurização solar de água é uma alternativa sustentável e barata para descontaminação microbiológica de água para consumo humano. Neste artigo, propomos um pasteurizador solar com concentrador cilíndrico-parabólico e controle automático de vazão. Apresentamos resultados da otimização da geometria do concentrador para as condições de irradiação normal direta de Mossoró-RN. Apresentamos pseudocódigos para o controle do seguidor solar e para o controle automático de vazão usando válvulas solenoides. O esquema de controle de vazão segue a sugestão de Carielo et al. (2017) para garantia de tempos e temperaturas de pasteurização. Do modelo otimizado do concentrador, calculamos a produção teórica diária de água pasteurizada no dia de maior irradiação normal para cada mês do ano de 2018, chegando a um máximo de 90 l/dia no mês de agosto.

Palavras-chave: *Concentrador Cilíndrico-parabólico, Pasteurização Solar, Pasteurização de Água.*

Área temática: *Conversão Térmica com Concentradores*

Subárea temática: *Coletores concentradores e sistemas para conversão térmica em média temperatura*

OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA E AUTOMATIZAÇÃO PARA UM PASTEURIZADOR COM CONCENTRADOR CILÍNDRICO-PARABÓLICO

Gustavo Krause Vieira Garcia – e-mail: gustavo-krause@hotmail.com

Antonio Lucas dos Santos Carlos – e-mail: lucas-_7@outlook.com

Neemias Dantas Fernandes – neemiasdf@gmail.com

Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Departamento de Engenharia e Tecnologia

Taciano Sorrentino – taciano@ufersa.edu.br

Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Departamento de Ciências Naturais, Matemática e Estatística

3.1 - Coletores concentradores e sistemas para conversão térmica em média temperatura

Resumo. O consumo de água contaminada ainda é causa de adoecimento e mortes em muitas partes do mundo. A pasteurização solar de água é uma alternativa sustentável e barata para descontaminação microbiológica de água para consumo humano. Neste artigo, propõe-se um pasteurizador solar com concentrador cilíndrico-parabólico e controle automático de vazão. Apresentam-se resultados da otimização da geometria do concentrador para as condições de irradiação normal direta de Mossoró-RN. Apresentam-se pseudocódigos para o controle do seguidor solar e para o controle automático de vazão usando válvulas solenoides. O esquema de controle de vazão segue a sugestão de Carielo *et al.* (2017) para garantia de tempos e temperaturas de pasteurização. Do modelo otimizado do concentrador, calcula-se a produção teórica diária de água pasteurizada no dia de maior irradiação normal para cada mês do ano de 2018, chegando a um máximo de 90 l/dia no mês de agosto.

Palavras-chave: Concentrador Cilíndrico-parabólico, Pasteurização Solar, Pasteurização de Água.

1. INTRODUÇÃO

Água segura para beber é um recurso indispensável para comunidades humanas. No entanto, a Organização Mundial de Saúde e a UNICEF estimam que, em 2015, 844 milhões de pessoas não tinham acesso, ou tinham que se deslocar por mais de 30 minutos para ter acesso, a água para beber. Globalmente, pelo menos 2 bilhões de pessoas usam uma fonte de água para beber contaminada por fezes. Cerca de 361 mil crianças abaixo de cinco anos morrem anualmente por diarreia e o consumo de água contaminada também está relacionado à transmissão de doenças como cólera, hepatite A e tifo, entre outras (WHO e UNICEF, 2017). No Brasil, em 2011, 396 mil pessoas foram internadas por diarreia, sendo 138 mil crianças menores de 5 anos (DATASUS, 2012). É importante, portanto, desenvolver soluções para descontaminação microbiológica de água para consumo humano, sobretudo com possibilidades de uso em comunidades rurais distantes dos centros urbanos e com acesso limitado a rede elétrica.

Apesar da informação muito difundida de que a água deve ser fervida antes de beber, os microrganismos nocivos ao ser humano podem ser inativados a temperaturas mais baixas que a de ebulição da água se a água for mantida por tempo suficiente a essas temperaturas, processo chamado de pasteurização (Feachem *et al.*, 1983). O tempo necessário para a inativação depende do microrganismo, mas tipicamente esse tempo diminui exponencialmente com a temperatura. O uso de radiação solar para tratar água para consumo humano é investigado sistematicamente desde os anos 1980 (Ciocchetti e Metcalf, 1984), e muitas abordagens foram propostas. Quanto ao mecanismo de inativação dos patógenos, a água pode ficar exposta à luz solar, aproveitando-se assim a sinergia entre o efeito letal sobre microrganismos da radiação de maior frequência presente no espectro solar (UV e violeta) e o efeito térmico (Tyrrel, 1976), método que ficou conhecido como SODIS (*solar disinfection*), como por exemplo, em (Ciocchetti e Metcalf, 1983; Borde *et al.*, 2016), ou a água é mantida num recipiente opaco, geralmente pintado de preto, e o mecanismo de inativação é só o térmico, método conhecido como SOPAS (*solar pasteurization*). Sistemas de pasteurização solar com diferentes tipos de coletor já foram reportados, como coletores planos (Carielo *et al.*, 2016), concentradores cilíndrico-parabólicos (Bigoni *et al.*, 2014; Sakhrieh *et al.*, 2016), concentradores tipo Fresnel (Domingos *et al.*, 2019), concentradores parabólicos compostos (Navntoft *et al.*, 2008), etc., com diferentes áreas de coleta. Diferentes tipos de controle de vazão, que permitem o armazenamento da água já tratada para uso posterior e a admissão de nova carga de água contaminada no recipiente de pasteurização, também já foram usados: diferença de densidade entre porções de água a diferentes temperaturas (Duff e Hodgson, 2005); válvulas termostáticas, que abrem quando determinada temperatura é atingida e fecham quando temperatura cai (Bigoni *et al.*, 2013); e válvulas solenoides (El Ghetany e Dayem, 2010).

Recentemente, Carielo *et al.* (2017) observaram que o uso de sistemas de vazão baseados em diferenças de densidade e válvulas termostáticas não garante um bom controle do tempo de pasteurização, e da temperatura à qual a água foi mantida durante esse tempo. Outra desvantagem que apontam no uso de válvulas termostáticas é que só é possível acionar o escoamento da água pasteurizada a uma única temperatura. Propuseram então um sistema microcontrolado que usa válvulas solenoides e estabelece vários *set points* de temperatura, cada um com um tempo de pasteurização pré-

programado. A cada vez que a temperatura chega a um dos *set points* um contador é acionado. Se a temperatura ficar abaixo da temperatura do último *set point* atingido, o respectivo contador é pausado, e só volta a ser incrementado novamente após a temperatura voltar a ser igual ou superior a desse *set point*. Se a água permanecer a uma temperatura maior ou igual a do *set point* pelo respectivo tempo pré-programado, a válvula de saída libera a água pasteurizada e a de entrada admite uma nova carga de água contaminada. Nessas condições de garantia estrita de tempo e temperatura de pasteurização, usando um coletor plano com capacidade para 2 l de água e abertura de 2 m² o sistema chegou a uma produção diária máxima de 80 litros de água pasteurizada (Carielo *et al.*, 2017).

Nesse artigo, considera-se a aplicação do esquema de controle proposto por Carielo *et al.* (2017) a um pasteurizador solar baseado em outro tipo de coletor, um concentrador cilíndrico-parabólico, com eficiência otimizada para as condições de irradiação normal direta de Mossoró-RN, e estima-se a produção diária máxima de água pasteurizada para essas condições. Primeiro, são apresentadas características do concentrador e o modelo usado para a otimização. A seguir, apresenta-se um pseudocódigo e considerações sobre o controle de vazão, e pseudocódigos e considerações sobre o seguidor solar, indispensável para esse tipo de concentrador. Finalmente, são apresentados os resultados da otimização e das estimativas de produção diária e são discutidos esses resultados.

2. CARACTERÍSTICAS E MODELAGEM DO CONCENTRADOR

Para o desenvolvimento do modelo matemático que descreve o perfil da calha e posteriormente realizar sua modelagem, foram analisadas as variáveis nos aspectos ambiental ou climático e construtivo, avaliando a influência de todos esses parâmetros no intuito de gerar uma geometria que forneça maior eficiência ao sistema, aumentando a quantidade de água tratada.

2.1 Parâmetros geométricos

Dentre todas as superfícies cônicas, as parábolas se destacam quanto às suas propriedades geométricas, sendo a mais peculiar delas a convergência de qualquer reta que toque sua superfície interna diretamente em um ponto – no caso de uma superfície plana – ou em uma linha – perfis cilíndrico-parabólicos – respectivamente conhecidos como foco e linha focal. A equação 1 define esse tipo de geometria no plano.

$$y = \frac{1}{4f} x^2 \quad (1)$$

Em se tratando superfícies refletoras com esse perfil, existem diversos parâmetros a considerar ao projetar para que se atenda as condições de serviço, destacando-se o comprimento da calha (l), sua largura ou abertura (a), distância focal (f) e o ângulo de borda (ψ).

O comprimento e a abertura da calha são fatores que determinam a área de abertura. Tais variáveis estão diretamente ligadas a quantidade de energia captada e devem ser dimensionadas ponderando custos com materiais e a massa da estrutura. Além disso, a escolha deve estar diretamente ligada ao fator de concentração geométrica (CG), ilustrado na Fig. 1, definido como a razão entre a área de abertura ($A_{ap,c}$) e a área de recepção ($A_{ap,r}$), que é a área da superfície externa do tubo coletor.

$$CG = \frac{A_{ap,c}}{A_{ap,r}} \quad (2)$$

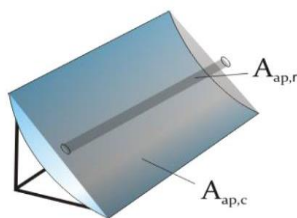


Figura 1 - Representação das áreas de abertura ($A_{ap,c}$) e recepção ($A_{ap,r}$) (Günther *et al.*, 2016).

No que tange à distância focal, sua influência está ligada ao grau de concavidade que terá a seção da cônica, como mostrado na Fig. 2. À medida que aumenta, a parábola se aproxima de uma reta, enquanto que a distância entre o tubo receptor e a calha aumentará, incrementando perdas térmicas no processo de concentração devido a remoção de calor por convecção do ar nas vizinhanças. No entanto, se a distância focal for muito pequena, também haverá perda de eficiência, já que feixes incidentes nas bordas da calha percorreram trajetos maiores e, conseqüentemente, se espalham mais até chegar ao tubo coletor.

Em se tratando do ângulo de borda, sua influência no projeto se mostra inversa as considerações feitas para o foco. Mantendo a abertura constante, variando distância focal e ângulo de borda, como mostrado na Fig. 2, é facilmente observado o comportamento proposto para tais parâmetros.

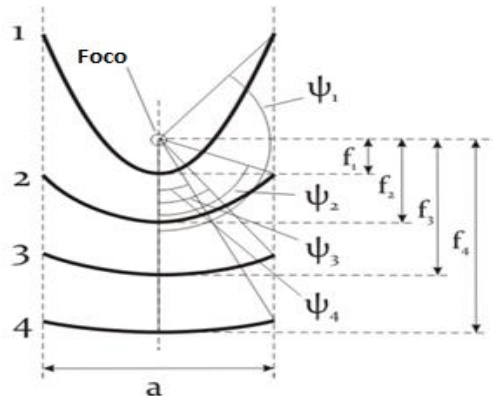


Figura 2 - Formato de seção parabólica variando foco e ângulo de borda (Günther *et al.*, 2016).

2.2 Material reflexivo

Para o material reflexivo, devem ser analisadas a resistência às intempéries como o vento e a umidade, a capacidade de refletir luz solar e seu custo. Nesse sentido, são filtrados dois materiais que atendem às exigências, os filmes de alumínio e os filmes de espelho baseados em prata. Apesar do primeiro material apresentar refletividade menor que a prata nos comprimentos de onda mais energéticos da radiação solar segundo Jagoo (2013), é facilmente moldável a superfícies com geometria complexa e custa bem menos que os filmes de prata. Portanto, é cabível a escolha dos filmes de alumínio.

2.3 Tubo coletor

O tubo coletor deve ser confeccionado a partir de um material que assegure boa transferência térmica sem grandes perdas por irradiação ou convecção e que ainda assim seja economicamente viável. No entanto, materiais que agregam todas as características físicas desejadas são dispendiosos, o que leva, na maioria das aplicações, ao uso de tubos com alta absorvância e baixa emissividade envoltos em um invólucro de vidro ou acrílico, materiais que apresentam boa transmissibilidade e baixa refletividade de acordo com Penafiel (2011). Apesar desse artifício acrescentar perdas óticas ao sistema, potencializa o ganho térmico ao limitar transferência térmica por irradiação e condução. Nesse sentido, utilizou-se uma liga de alumínio (6065-T6) para o tubo absorvedor e acrílico para o invólucro.

2.4 Eficiência dos concentradores

Existem vários modelos teóricos que avaliam a eficiência (η) de um coletor solar, mas nenhum deles abrange de forma integral todas as variáveis incluídas na análise devido ao grau de complexidade que envolve correlacioná-las. De forma geral, as equações que quantificam tal grandeza se baseiam na fração da potência que incide no plano de abertura do coletor (\dot{Q}) pela que chega ao tubo do concentrador (\dot{q}).

$$\eta = \frac{\dot{q}}{\dot{Q}} \quad (3)$$

Admitindo que haja um sistema de rastreamento suficientemente calibrado que minimize as perdas por grandes ângulo de incidência, é possível estimar a quantidade de calor que adentra o sistema através de uma relação simples entre a irradiação direta incidente (G) em certo intervalo de tempo e a área de abertura da calha (A).

$$Q = \left(\int_{t_1}^{t_2} G dt \right) \cdot A \quad (4)$$

Ao contrário da energia fornecida, a potência útil é sensível à diversos parâmetros físicos. Dentre os mais relevantes estão: a refletância do material da calha (ρ), a transmitância do invólucro do coletor (τ), a absorvância do coletor (α), o coeficiente de transferência térmica por convecção entre o ar e o invólucro (h), do fator concentração geométrica da calha (CG), da diferença de temperatura entre o fluido aquecido (T_c) e o ambiente (T_a) e da emissividade do coletor (ε). Uma

das equações que relaciona de forma mais concreta todas essas variáveis baseia-se na norma ASHRAE 93-2010 que elenca metodologias para ensaios de eficiência em concentradores solares.

$$\dot{q} = G\tau\rho\alpha - \frac{h(T_c - T_a)}{CG} - \varepsilon\sigma T_c^4 \quad (5)$$

2.5 Modelo para otimização

Com base na equação para eficiência apresentada, é possível montar um modelo um tanto quanto abrangente para determinar quais as dimensões de calha fornecem a melhor resposta quando submetidas a certa condição solar. Definidas grandezas ópticas e térmicas que dependem da escolha dos materiais e das condições ambientais do local da instalação, resta estipular uma faixa de temperatura sob a qual os principais microorganismos presentes na água se degradem. Assim, é possível variar o fator de concentração geométrica da calha e definir qual é a melhor calha associada ao seu tubo coletor para tais condições de contorno. Nesse sentido, se torna conveniente correlacionar com o CG o máximo de parâmetros da seção parabólica para analisar sua influência no processo de otimização. Isso pode ser feito expressando a abertura do concentrador em função de tais variáveis. Usando geometria analítica simples, é possível estabelecer tais equações. A abertura da parábola como função do ângulo de borda, é dada pela equação (6) (Günther *et al.*, 2016):

$$a = f \left(-\frac{4}{\operatorname{tg}(\psi)} + \sqrt{\frac{16}{\operatorname{tg}^2(\psi)} + 16} \right) \quad (6)$$

Logo, a área de abertura é o produto entre o comprimento da calha (l) e a sua abertura (a):

$$A = l \cdot f \cdot \left(-\frac{4}{\operatorname{tg}(\psi)} + \sqrt{\frac{16}{\operatorname{tg}^2(\psi)} + 16} \right) \quad (7)$$

Sendo assim, o fator de concentração geométrica pode ser obtido usando (7) em (2):

$$CG = \left(\frac{f \cdot \left(-\frac{4}{\operatorname{tg}(\psi)} + \sqrt{\frac{16}{\operatorname{tg}^2(\psi)} + 16} \right)}{\pi \cdot d} \right) \quad (8)$$

Aplicando essas equações ao modelo em função do intervalo de tempo analisado (Δt), tem-se:

$$\eta = \frac{\left(\int_{t_1}^{t_2} G dt \right) \tau\rho\alpha - \frac{h\Delta t(T_c - T_a)}{CG} - \varepsilon\Delta t\sigma T_c^4}{\left(\int_{t_1}^{t_2} G dt \right)} \quad (9)$$

3. CONTROLE DE VAZÃO E PASTEURIZAÇÃO

O processo de inativação térmica de um patógeno possui um tempo mínimo de exposição determinado pela temperatura na qual o tratamento ocorre. O conjunto de valores de tempos de exposição e temperaturas para os quais o número de indivíduos de determinado patógeno sofre uma redução minimamente satisfatória para se determinar a pasteurização é chamada de curva de inativação. Uma das formas de garantir a pasteurização é estabelecer pontos de tempo e temperatura que se encontrem acima das curvas de inativação dos patógenos que se deseja eliminar. Os microorganismos *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* e coliformes, mostram inativação total para os pontos 3600 s à 55°C; 2700 s à 60°C; 1800 s à 65°C; 900 s à 75°C e 15 s à 85°C (Carielo *et al.*, 2017).

Tendo em vista os requisitos exigidos, o sistema de controle de vazão tem como função separar uma porção da água em tratamento em um recipiente por um tempo até que um dos pontos pré-estabelecidos seja atingido.

Para manter este controle devem ser utilizados sensores termopar a prova d'água para a medição contínua da temperatura e válvulas solenoides para o controle do fluxo de água, ambos acionados por um microcontrolador Arduino, o qual segue a rotina mostrada na Figura 3. Após preenchido o recipiente coletor de energia solar, é iniciada a leitura de temperaturas. Cada uma das temperaturas de inativação supracitadas, tem um contador atrelado a ela. Enquanto a

temperatura medida for superior à do ponto de inativação o contador permanece tendo seu valor incrementado. Ao atingir o tempo de inativação necessário a válvula de escoamento é aberta por tempo suficiente para esvaziar o tubo coletor, e depois essa válvula se fecha e a de alimentação é aberta, dando início a um novo ciclo.

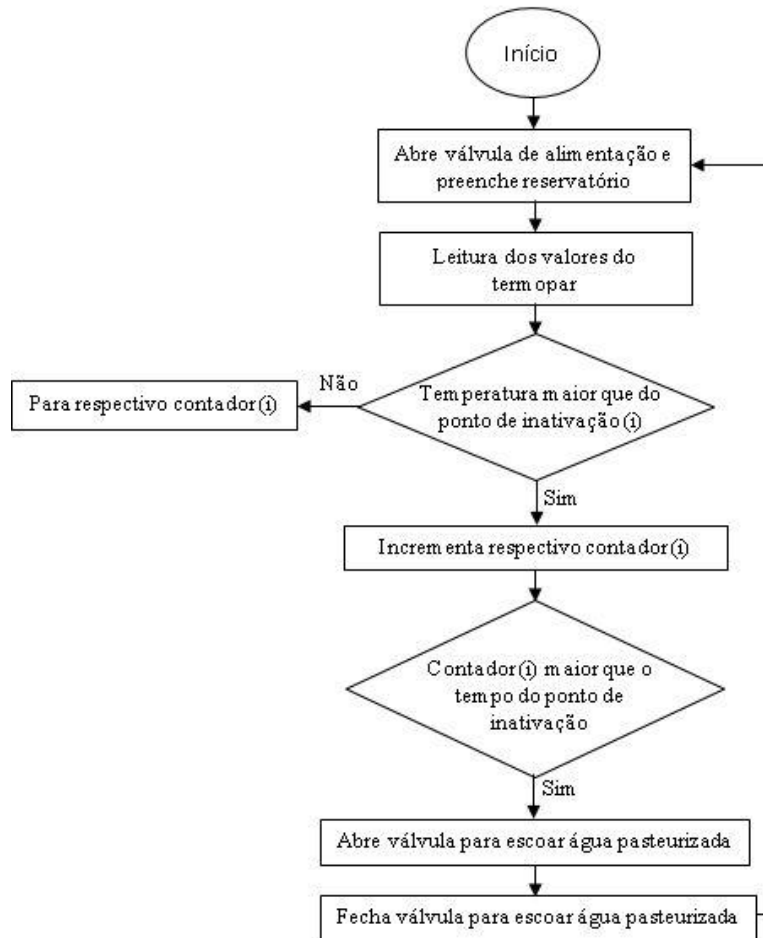


Figura 3 – Pseudocódigo para controle de vazão.

4. SEGUIDOR SOLAR E ALIMENTAÇÃO

4.1 Seguidor solar

O sistema de rastreamento solar desenvolvido consiste em três partes: o dispositivo de movimentação dos eixos, os sensores e a unidade de controle.

Dispositivo de movimentação dos eixos. Para um sistema de movimentação de dois eixos, a configuração consiste em dois motores de passo, um para cada eixo. Sendo assim, um motor fica na posição horizontal e outro na posição vertical. A Figura 4-a ilustra o sistema de posicionamento dos motores.

Sensores. O LDR (*Light Dependent Resistor* ou Resistor Dependente de Luz), é um dispositivo eletrônico passivo capaz de variar sua resistência elétrica conforme a intensidade de luz que incide sobre ele. Para conseguir medir a variação de luz obtida a partir do LDR, podemos utilizar da propriedade do divisor de tensão e medir a variação da queda de tensão no elemento (McRoberts, 2011). Dessa maneira, um terminal do LDR é conectado a alimentação, o outro terminal é conectado à porta de leitura analógica, onde, no mesmo ponto é conectado um resistor para ser formado o divisor de tensão. Para o seguidor solar de dois eixos, adota-se um sistema com quatro LDRs divididos por um material opaco em quatro setores, conforme mostra a Figura 5-a. Um seguidor solar de um eixo (e um motor, como na Fig. 4-b), mais simples e econômico, que usa apenas dois sensores, é ilustrado na figura 5-b.

Quando o sistema não está mais alinhado com o Sol, um ou mais dos LDRs estarão sombreados mandando a informação para unidade de controle corrigir o alinhamento.

Unidade de controle. O Arduino é uma plataforma de hardware e software aberto que possibilita praticamente que qualquer pessoa consiga realizar um projeto com eletrônica (McRoberts, 2011). Devido a sua alta difusão entre a comunidade e grande documentação, realizar um projeto com Arduino se torna mais prático e rápido, embora que ao necessitar de algo mais escalável industrialmente é recomendado adotar outras plataformas. O Arduino Uno possui seis

portas analógicas, quatorze portas digitais, sendo seis delas PWM, conexões GND e de 5 V, além de outras entradas e acessórios que podem ser incorporados para aumentar sua abrangência. Toda programação é feita em uma linguagem própria baseada em C++, onde cada elemento eletrônico possui uma biblioteca para facilitar o desenvolvimento do código.

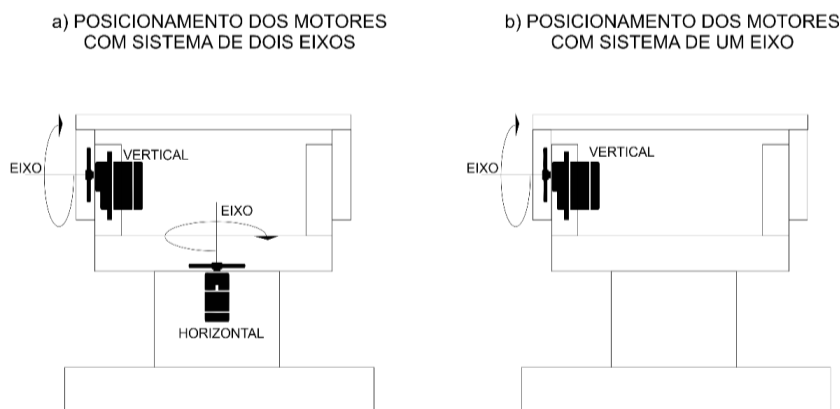


Figura 4 - Posicionamento dos motores.

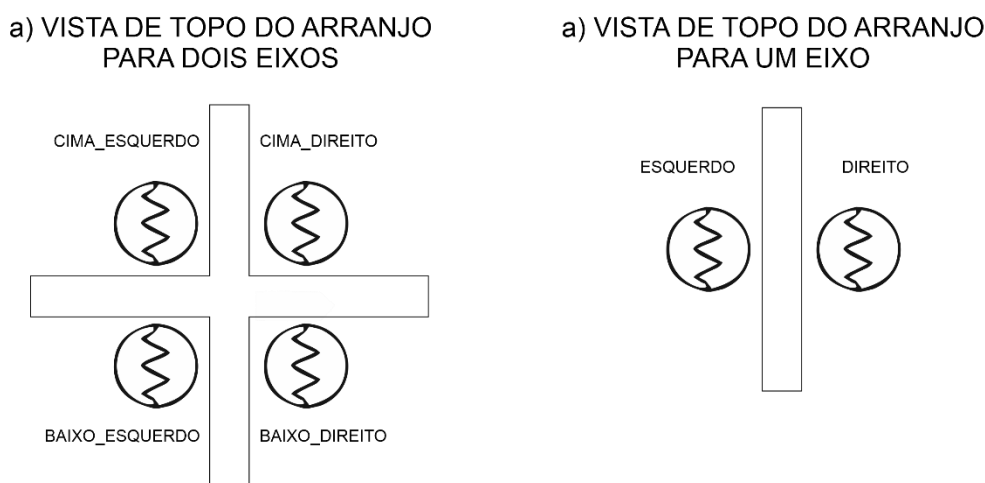


Figura 5 - Vista de topo do arranjo de LDRs.

Seguidor solar com um eixo. A utilização de dois eixos para o seguidor solar traz um custo de dois motores e um arranjo de sensores mais complexo, e, na maioria das vezes, o ganho obtido em seguir o sol através dos dois eixos não compensa o maior gasto. Um sistema mais simples e mais barato de rastreamento solar, com apenas um grau de liberdade, reduzindo o número de motores para um (Figura 4-b) e o arranjo de LDRs (Figura 5-b), pode ser usado.

Algoritmo. O algoritmo necessário para o funcionamento está representado em pseudocódigo na Figura 6.

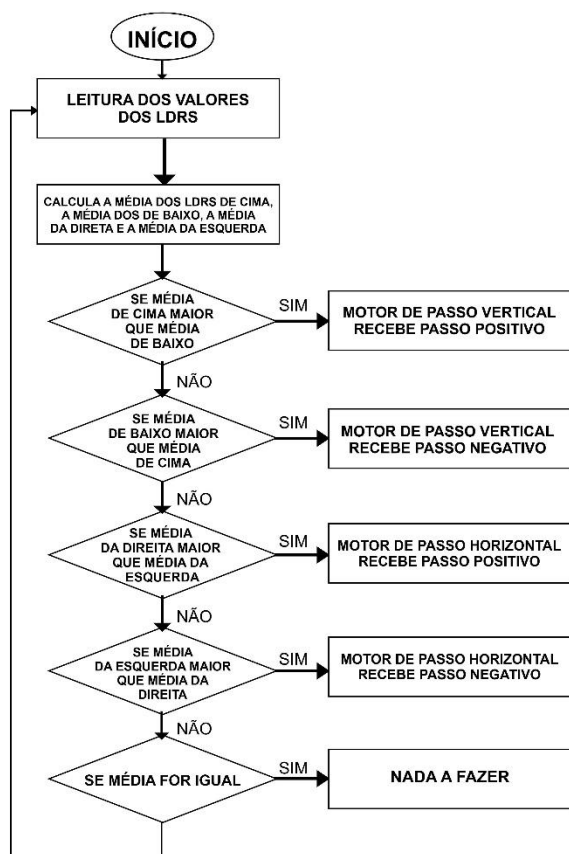
4.2 Alimentação

Para um sistema que utiliza o sol como fonte de energia, optou-se por abastecê-lo através de placas fotovoltaicas, que entregariam a energia necessária para a alimentação do motor, sistema de válvulas e sistema de controle. Para dimensionar um sistema de abastecimento isolado corretamente é necessário traçar uma curva de demanda, onde essa, consiste no comportamento do consumo de energia pelo sistema utilizado. Para traçar essa curva de demanda foram consideradas as potências fornecidas pelo fabricante de cada equipamento e testes individuais de demanda podem ser realizados.

Assim, utilizando os dados de potência do motor e quantas horas ele estaria em uso, com a potência das válvulas e o tempo de uso e a demanda da unidade de controle e o tempo de uso, foi possível traçar o consumo previsto para o sistema durante o dia, isso aliado ao número de bateladas realizadas pelo sistema (CRESESB, 2014).

Dessa forma foi obtida a energia total demandada pelo pasteurizador. Com a utilização do software Radasol 2 para conseguir os dados de insolação na região, foi possível determinar a potência do módulo fotovoltaico capaz de suprir a demanda de energia consumida pelo sistema durante o dia.

a) PSEUDOCÓDIGO PARA SISTEMA COM DOIS EIXOS



b) PSEUDOCÓDIGO PARA SISTEMA COM UM EIXO

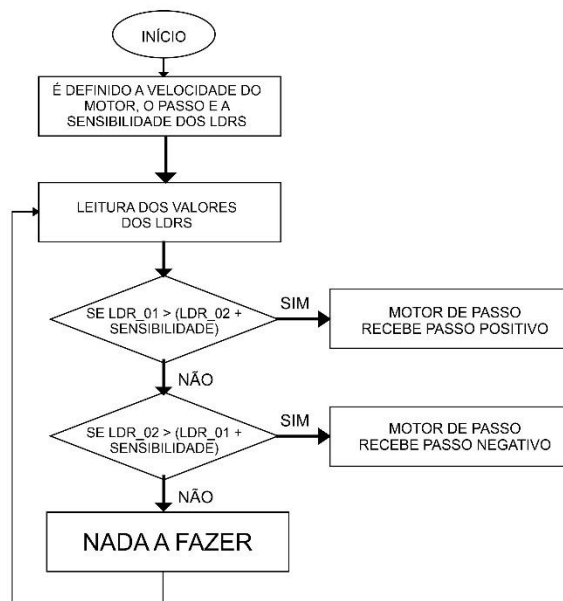


Figura 6 – Pseudocódigos para os seguidores solares.

5. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Definido o modelo, é preciso estabelecer as condições sob as quais será utilizado e a faixa de valores para as variáveis envolvidas, buscando o projeto mais compacto e eficiente possível. Na Tab.1 elencam-se esses parâmetros. Todas as constantes foram estabelecidas de acordo com as literaturas que trazem-nas para cada material ou condições propostas.

Tabela 1- Condições de contorno para a otimização.

Variável	Intervalo ou valor	Material/condição
Transmitância do invólucro (τ)	0,92	Acrílico
Refletância da calha (ρ)	0,95	Filme de alumínio
Absorbância do coletor (α)	0,97	Alumínio
Emissividade do coletor (ε)	0,90	Alumínio (pintado de preto)
Coefficiente de convecção (h)	$10 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	30°C de diferença coletor e invólucro
Ângulo de borda (ψ)	$45^\circ \leq \psi \leq 90^\circ$	-
Diâmetro do coletor (d)	$12,5 \text{ mm} \leq d \leq 25,4 \text{ mm}$	-
Comprimento focal (f)	$0,2 \text{ m} \leq f \leq 1,5 \text{ m}$	-
Temperatura do ambiente (T_a)	$30^\circ\text{C} \leq T_a \leq 40^\circ\text{C}$	-
Temperatura do coletor (T_c)	$70^\circ\text{C} \leq T_c \leq 100^\circ\text{C}$	-

Em se tratando da irradiação direta, obtiveram-se os dados para a cidade de Mossoró através do software Radiasol para o mês com maior irradiação diária de 2019, no caso outubro. A Fig. 5 apresenta tais dados.

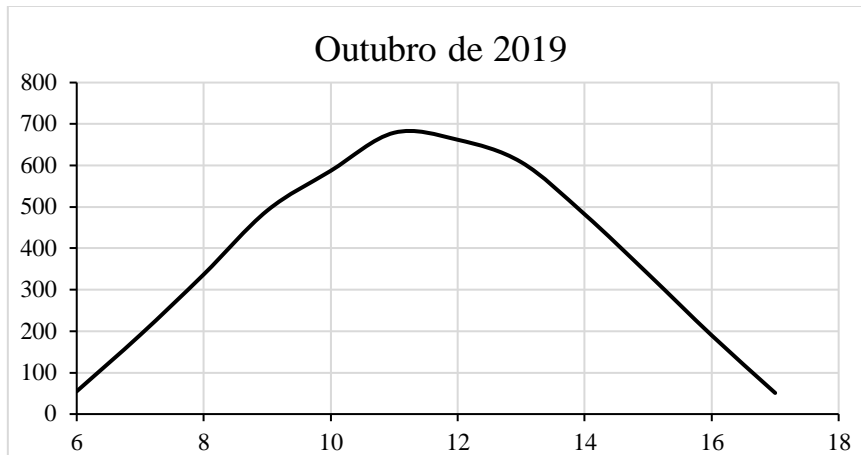


Figura 7 - Irradiação solar média por hora no dia de maior insolação de outubro.

Para a otimização, serão utilizados os dados do mês com maior irradiação média, ou seja, outubro. Pelo gráfico, observa-se que o pico de DNI ocorre entre às 10 h e 12 h. Portanto, a energia total disponível neste intervalo corresponde área sob a curva. Integrando a curva no intervalo estabelecido, obtém-se a irradiação total no período.

$$G \cong 4709 \text{ kJ/m}^2$$

Em posse dos dados, utilizou-se a ferramenta para solução de problemas de otimização do software *MatLab*, mais precisamente, a rotina *fmincon*, baseada em uma lógica que usa o método dos pontos interiores. Além das condições propostas, foi atribuída às entradas da rotina uma restrição para garantir que a abertura da calha não ultrapassasse 2 m de comprimento, assegurando o formato compacto.

As respostas foram obtidas depois de 42 iterações, satisfazendo uma tolerância $\zeta = 1 \times 10^{-6}$. Nessas condições, os parâmetros obtidos para maior eficiência são representados na Tab. 2.

Tabela 2 - Variáveis obtidas na otimização.

Variável	Valor
Eficiência (η)	28,573 %
Ângulo de borda (ψ)	64,5251°
Diâmetro do coletor (d)	12,501 mm
Comprimento focal (f)	0,6137 m
Temperatura do ambiente (T_a)	39,9969 °C
Temperatura do coletor (T_c)	70 °C

Com esses dados é possível definir qual será a parábola da seção através da equação 10.

$$y = 0,407365162x^2 \quad (10)$$

Por fim, uma maneira de calcular a quantidade de água pasteurizada é dada por uma relação entre as quantidades de calor necessárias para aquecê-la à 70 °C e manter por 15 min, condições mínimas para pasteurizar segundo (Carielo *et al.*, 2017). A energia necessária para tal (Q_e) pode ser estimada pela equação 11,

$$Q_e = mc\Delta T + \varepsilon dl\sigma \left[\frac{(T_{final}^4 - T_{inicial}^4)mc\Delta T}{P_u} + T_{final}^4 \Delta t \right] \quad (11)$$

onde m representa a massa de água tratada naquele instante, c o calor específico da água, ΔT a variação de temperatura da água, T a temperatura do coletor aquecido, Δt o intervalo de tempo associado (15 min), l e a , são respectivamente, abertura e comprimento da calha e P_u a potência média útil. Isolando a massa, tem-se:

$$m = \frac{(Q_e - \varepsilon dl\sigma T_{final}^4 \Delta t)P_u}{c\Delta T [\varepsilon dl\sigma (T_{final}^4 - T_{inicial}^4) + P_u]} \quad (12)$$

Novamente devido a premissa de ser compacta e ao fato da influência do comprimento ser trivial em comparação a seção parabólica, adotou-se um valor de 1,5 m. Em geral, a eficiência condiz com coletores de pequeno porte já desenvolvidos utilizando critérios semelhantes, como feito por (Silva, 2015) que obteve 27,7% de eficiência. Na Fig. 8, são apresentadas as quantidades de água obtidas para a calha proposta neste trabalho em função do valor médio diário de DNI para os dias com maior irradiação em cada mês do ano de 2018 para a cidade de Mossoró. Os dados foram obtidos através do *software* Radiasol 2 desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da UFRGS.

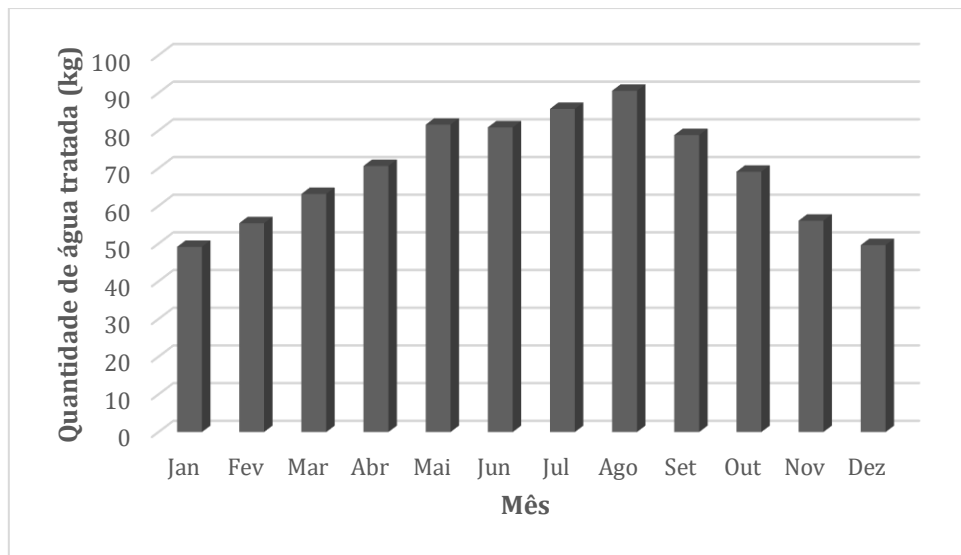


Figura 8 - Quantidade de água pasteurizada.

Bigoni *et al.* (2014) fizeram testes com pasteurização de água utilizando um coletor cilíndrico parabólico na cidade de Dübendorf na Suíça, obtendo no máximo 66 litros do líquido pasteurizado por dia, com um concentrador de 5,7 m² de abertura e uma válvula termostática que abria a 87°C. Carielo *et al.*, usando um coletor plano de 2 m² de área, chegaram a produzir um máximo de 80 l. Da Fig. 8 observamos que a produção teórica do pasteurizador proposto ultrapassa os 80 l com a DNI diária máxima mensal em quatro meses, tendo podido chegar a 90 l no mês de agosto de 2018.

6. CONCLUSÕES

Propõe-se um pasteurizador solar com concentrado cilíndrico-parabólico e controle automático de vazão. Apresentamos pseudocódigos usados no controle do seguidor solar e no controle automático de vazão, seguindo a proposta de Carielo *et al.* (2017) para efetivo controle de temperaturas e tempos de pasteurização. Fazendo uma otimização de parâmetros geométricos do concentrador calculamos uma eficiência ótima e calculamos a quantidade teórica máxima de água que o pasteurizador poderia produzir por dia em cada mês de 2018, com uma temperatura de pasteurização de 70°C, chegando a um valor máximo diário de 90 l no mês de agosto de 2018.

Agradecimentos

Esse trabalho foi desenvolvido com o apoio da UFERSA por meio dos editais PROPPG/UFERSA 19/2018, IC 05/2018 e IC 11/2019.

REFERÊNCIAS

- ANSI/ASHRAE 93-2010 (2010). Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, p. 42.
- Bigoni, R. *et al.*, 2014. Solar water disinfection by a Parabolic Trough Concentrator (PTC): flow-cytometric analysis of bacterial inactivation, *Journal of Cleaner Production*, v. 67, pp. 62-71.
- Borde, P., Elmusharaf, K., McGuigan K. G., Keogh, M. B., 2016. Community challenges when using large plastic bottles for Solar Energy Disinfection of Water (SODIS), *BMC Public Health*, v.16, 931.
- Carielo, G., Calazans, G., Lima, G., Tiba, C., 2017. Solar water pasteurizer: Productivity and treatment efficiency in microbial decontamination, *Renewable Energy*, v. 105, pp. 257-269.
- Carielo, G.; Calazans, G.M.T.; Tiba, C., 2016. Solar pasteurizer for the microbiological decontamination of water, *Renewable Energy*, v. 87, pp. 711-719.
- Ciochetti, David A.; Metcalf, Robert H., 1984. Pasteurization of Naturally Contaminated Water with Solar Energy. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 47, n. 2, pp. 223-228.
- CRESESB, 2014. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, CEPEL, Rio de Janeiro.
- DATASUS, 2012. Indicadores e Dados Básicos - Brasil - 2012. Datasus. Disponível em: <<http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/idb2012/matriz.htm#mort%20>>. Acesso em 17/04/2018.
- Domingos, M.; Sanchez, B.; Vieira-da-Motta, O.; Samarão, S. S.; Canela, M. C., 2019. A new automated solar disc for water disinfection by pasteurization, *Photochemical and Photobiological Sciences*, v. 18, pp. 905-911.
- Duff, W. S., Hodgson, D. A., 2005. A simple high efficiency solar water purification system, *Solar Energy*, v. 79, n. 1, pp. 25-32.
- El Ghetany, H.H., Dayem, A., 2010. Numerical simulation and experimental validation of a controlled flow solar water disinfection system, *Desalination and Water Treatment*, v. 20, pp. 11-21.
- Feachem, Richard; Mara, D. Duncan; Bradley, David J., 1983. Sanitation and disease. Washington DC, USA:: John Wiley & Sons.
- Günther, M., Joemann, M., Csambor, S., (Org.) 2016. Parabolic Trough Technology, *Advanced CSP Teaching Materials*.
- Jagoo, Z., 2013. Tracking Solar Collectors: A Low Budget Solution, pp. 54-55, Springer.
- McRoberts, M., 2011. *Arduino Básico* - Novatec Editora.
- Navntoft C.; Ubomba-Jaswa, E.; McGuigan, K.G.; Fernández-Ibáñez P., 2008. Effectiveness of solar disinfection using batch reactors with non-imaging aluminum reflectors under real conditions: natural well-water and solar light, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, v. 93, n. 3, pp. 155-161.
- Penafiel, R. A. S., 2011. Cenários de geração de eletricidade a partir de geradores heliotérmicos no Brasil: a influência do armazenamento de calor e da hibridização. Dissertação de Mestrado - UFRJ.
- Sakhrieh, A. *et al.*, 2016. Water disinfection using CSP technology. *International Journal of Applied Engineering Research*, v. 11, n. 15, pp. 8673-8680.
- Silva, L. P. L., 2015. Desenvolvimento de um coletor solar cilíndrico parabólico para baixas e médias temperaturas. Dissertação de Mestrado, UFCG.
- Tyrrel, Rex M., 1976. Synergistic lethal action of ultraviolet-violet radiations and mild heat in *Escherichia coli*, *Photochemistry and Photobiology*, v. 24, n. 4, pp. 345-351.

GEOMETRIC OPTIMIZATION AND AUTOMATION FOR A PASTEURIZER WITH CYLINDRIC-PARABOLIC CONCENTRATOR

Abstract. Consumption of contaminated water is still a cause of illness and death in many parts of the world. Solar water pasteurization is a sustainable and inexpensive alternative for microbiological decontamination of drinking water. In this paper, we propose a solar pasteurizer with parabolic trough concentrator and automatic flow control. We present results of concentrator geometry optimization for normal direct irradiation conditions of Mossoró-RN. We present pseudocodes for solar tracker control and automatic flow control using solenoid valves. The flow control scheme follows the suggestion of Carielo *et al.* (2017) to guarantee pasteurization times and temperatures. From the optimized concentrator model, we calculate the daily theoretical production of pasteurized water on the day of highest normal direct irradiation for each month of 2018, achieving a maximum of 90 l/day in August.

Key words: Parabolic trough concentrator, Solar pasteurization, Water pasteurization.