

TESTES DE CAMPO DE UM PROTÓTIPO DE PASTEURIZADOR SOLAR COM CONTROLE DE VAZÃO AUTOMATIZADO

Marcos Vinícius Medeiros Araújo – marcos.araujo@alunos.ufersa.edu.br

Lucas Costa Fernande

Artur Rocha Albuquerque

Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Mossoró

Taciano Amaral Sorrentino

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

Número do trabalho: 239. Tema: Sistemas solares térmicos: aquecimento de água, espaço e refrigeração

Resumo. Diante do desafio de acesso à água potável de qualidade, enfrentado em muitas regiões do mundo, e de modo a maximizar o aproveitamento energético proveniente de fontes renováveis, o uso do pasteurizador solar é visto como instrumento viável, por realizar a descontaminação microbiológica da água com uso de radiação solar. Sendo assim, o presente estudo buscou avaliar a operação e a caracterização de um pasteurizador solar automatizado de calha parabólica. Trata-se de uma pesquisa quantitativa, experimental e descritiva, sendo realizados testes de campo visando a análise da eficácia e produtividade do sistema. Nestes, foi possível atestar a eficácia do protótipo quanto à inativação dos patógenos presentes na água, tornando-a adequada para o consumo humano, como também foi possível operar ininterruptamente o controle de vazão por algumas horas, realizando um total de 19 bateladas em pouco mais de duas horas de funcionamento.

Palavras-chave: Pasteurização solar, Purificação solar da água, Descontaminação microbiológica da água

1. INTRODUÇÃO

Dentre os maiores desafios enfrentados neste século está o acesso à água potável de qualidade. Segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), cerca de um terço da população mundial está inserida em regiões em que a água doce é insuficiente para sustentá-la. Sendo esperado que, até 2025, dois terços da população mundial enfrentem escassez de água (Jardin, 2012). Tal realidade está em desacordo com o previsto pelo Pacto Internacional sobre os Direitos Econômicos, Sociais e Culturais (ICESCR), formulado pela Alta Comissão dos Direitos Humanos da Organização das Nações Unidas (ONU), o qual determina o acesso à água como um direito cultural, econômico e social (United Nations, 2017).

Não obstante o quadro restritivo, é possível identificar uma sobreposição regional com relação aos indicadores de desigualdade social e de falta de acesso à água de qualidade. Com isso, figura uma realidade que tem como consequência a maximização da desigualdade hídrica e social, configurando-se como uma crise socioambiental (Maia, 2017).

Tal crise, caracterizada como fator agravante das condições precárias de vida, torna a população carente dependente do consumo de água com qualidade sanitária duvidosa e em volume insuficiente e irregular para o atendimento das necessidades básicas diárias (Razzolini; Günther, 2008; Hajissa *et al.*, 2022), o que eleva os indicadores de saúde associados à incidência de patologias infecciosas e parasitárias, aumentando a mortalidade em geral, e especialmente a infantil (Ehrenberg *et al.*, 2021).

No tocante à melhoria da qualidade de vida, além do acesso à água doce, a energia se mostra como um requisito essencial para a melhoria do estilo de vida e do desenvolvimento geral (Singh; Chandra, 2023). No entanto, o que se identifica é a inserção mundial em uma visível crise energética, tendo em vista o esgotamento das fontes convencionais de energia, como os combustíveis fósseis, e o impacto ambiental do uso destes, maximizando o efeito estufa e a ocorrência de chuvas ácidas (Javadi; Saidur; Kamalisarvestani, 2013; Verma; Tiwari, 2015; Dutta *et al.*, 2021).

De modo a mitigar tal crise, o uso de fontes de energia sustentável se mostra promissora. Dentre estas, a energia solar é apontada como protagonista, tendo em vista sua vasta disponibilidade e o baixo impacto atmosférico e ecológico (Xia; Xia, 2010; Kapoor *et al.*, 2014). No entanto, apenas 0,02% desta energia está atualmente em utilização, mesmo tendo potencial suficiente para satisfazer a demanda energética mundial por completo (Xia; Xia, 2010; Kapoor *et al.*, 2014; Hussein *et al.*, 2017).

Com isso, de modo a aproveitar a energia solar, fonte limpa e renovável, e tornar disponível a água potável em locais de difícil acesso, o uso do pasteurizador solar de calha parabólica é visto como uma alternativa. Este se apresenta como um instrumento capaz de, por meio de um sistema de espelhos ou materiais refletivos, focar os raios solares em um tubo com fluido em seu interior; promovendo, a partir de um sistema de controle de vazão e temperatura, a pasteurização deste, inativando os micro-organismos nocivos à saúde e tornando a água adequada para uso (Kapoor *et al.*, 2014; Hussein *et al.*, 2017; Bindu; Joseline Herbert, 2020).

Diante do exposto, o presente estudo buscou avaliar a operação e a caracterização de um pasteurizador solar automatizado de calha parabólica. Este equipamento foi desenvolvido visando a descontaminação microbiológica da água, de modo a prover uma alternativa para populações que dispõem apenas de fontes de água inseguras e não dispõem de energia elétrica ou combustíveis para tratar a água para o consumo humano.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Inativação térmica de patógenos

O processo de inativação térmica de patógenos faz parte de um rol de mecanismos que tem como finalidade central a descontaminação microbiológica da água a partir do calor. Entre tais métodos estão a fervura e a pasteurização térmica.

A fervura se baseia na elevação da temperatura até atingir o ponto de ebulição da água (University of Dhaka, 2023). Esta técnica é comumente utilizada em áreas rurais, tendo como combustível gerador de energia o carvão e a lenha. Em média, faz-se necessário a queima de um quilograma de madeira para ferver um litro de água, o que gera impacto ambiental ao degradar o bioma local (Acra; Raffoul; Karahagopian, 1984; Ellis, 1991; WHO, 2023). Torna-se, assim, de suma importância a busca por outras fontes de energia para o aquecimento da água em diversas situações rurais, tendo em vista o impacto ambiental e a escassez da matéria-prima utilizada.

Já a pasteurização térmica está associada ao aumento da temperatura da água a ponto de torná-la segura para ingestão oral. Sendo assim, por meio dessa técnica não há a necessidade da eliminação completa de patógenos, mas sim da redução da população de micro-organismos, até um nível em que não há impacto para a saúde de seu consumidor (Burch; Thomas, 2018).

Quanto à duração do tratamento, vê-se que esta depende do tipo do micro-organismo a ser eliminado e da temperatura máxima que pode ser alcançada, tendo em vista que a tolerância térmica é individual de cada patógeno. No entanto, o que os estudos trazem é que, dependendo do agente a ser eliminado, a sua imensa maioria tem temperaturas de inativação térmica abaixo do ponto de ebulição da água (Abraham; Plourde; Minkowycz, 2015).

Como fonte de energia para a pasteurização térmica, pode ser utilizada a energia solar, sendo caracterizada então como pasteurização solar. Obtendo, por meio desse mecanismo, resultados equivalentes ao da fervura, com o mínimo impacto ambiental. Entre os instrumentos disponíveis para alcançar tal fim está o concentrador de calha parabólica (Fernández-García *et al.*, 2010).

2.2 Concentrador de calha parabólica

O concentrador de calha parabólica é caracterizado como sendo um instrumento capaz de absorver a radiação solar e convertê-la em calor útil. Entre seus componentes estão: (1) chapa refletora composta por material reflexivo, tendo formato cilíndrico-parabólico; (2) tubo absorvedor, de metal, com o fluido de trabalho em seu interior e estando localizado na linha focal do concentrador; (3) tubo de vidro, responsável por envolver o tubo absorvedor, formando um espaçamento evacuado entre a parede de ambos, de modo a reduzir a perda de calor por convecção (Jebasingh; Herbert, 2016). Este último item é mais importante em aplicações a mais altas temperaturas e não está presente no concentrador usado neste trabalho.

Somado à estrutura do concentrador está a sua base. Estrutura rígida que sustenta a calha e que possui mecanismo de rastreamento solar movimentando o concentrador ao longo do dia, de modo a manter o plano de abertura da calha perpendicular à direção dos raios solares incidentes (Abdulhamed *et al.*, 2018).

Diante do exposto, o funcionamento dessa estrutura se baseia na incidência dos raios solares na chapa refletora, os quais são refletidos e focalizados no tubo absorvedor, aquecendo o fluido no interior deste, tendo como resultado final a conversão de radiação solar em calor útil (Jebasingh; Herbert, 2016).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo se trata de uma pesquisa quantitativa, experimental e descritiva. A partir do qual se buscou avaliar a operacionalização de um protótipo de concentrador solar de calha parabólica, descrevendo sua estruturação e analisando seu funcionamento. Dentre as etapas da pesquisa estão: 1) revisão da literatura; 2) desenvolvimento da rotina do controle de vazão; 3) realização do primeiro teste do protótipo em campo; 4) análise microbiológica das amostras de água pasteurizadas no primeiro teste; 5) melhoria do código referente ao controle de vazão; 6) realização do segundo teste do protótipo em campo.

3.1 Estrutura do protótipo desenvolvido

Levando em consideração a resistência às intempéries, refletida na durabilidade, a capacidade de refletir luz solar e o custo para instalação, o material reflexivo utilizado no protótipo foi uma chapa de inox 430, modificando o projeto inicial. Neste a chapa instalada previamente era constituída por alumínio, por ser facilmente moldável aos perfis parabólicos e por ter menor custo. No entanto, tal chapa prevista no projeto original rapidamente perdeu refletividade devido à oxidação. De modo a contornar o ocorrido, soldou-se uma chapa de inox 430 no concentrador. A área de abertura do concentrador com esse novo refletor é de 2,33 m².

Quanto à confecção do tubo absorvedor, foi utilizado aço inoxidável. Para a escolha deste material, foi levada em consideração a viabilidade econômica, bem como a segurança quanto à obtenção de uma transferência térmica eficaz.

No tubo absorvedor, constituindo o sistema de controle de vazão, uma conexão rosqueável em T em aço inoxidável foi projetada, obtendo, assim, uma saída de água. Esta deveria funcionar como suspiro, onde foi colocada uma terceira válvula solenoide, com abertura concomitante à válvula de entrada ou a de saída. Dessa forma, seria possível garantir que, durante a pasteurização, a água dentro do tubo ficasse sempre isolada do ambiente externo. Como também, por meio do suspiro, ser possível a saída de ar durante o carregamento de água no tubo absorvedor, porém, durante o descarregamento se percebeu que a válvula solenoide unidirecional usada não permitia a entrada de ar em quantidade adequada para o descarregamento da água, diminuindo assim um pouco a eficiência do equipamento.

A saída superior da conexão em T, onde a terceira válvula é conectada, é mantida sempre perpendicular ao plano da abertura da calha para evitar sombra na superfície refletora. A conexão também fica próxima à extremidade da calha por onde a água entra, a extremidade “sul”. Como a calha fica inclinada cerca de 15 graus para o norte, a extremidade de entrada fica mais alta em relação à de saída, como pode ser visto na Fig. 1, de forma que a água escape pela abertura da conexão em T apenas quando praticamente todo o tubo já está cheio de água e praticamente sem ar.



Figura 1 - Estrutura e inclinação da calha. (Autoria própria)

Inicialmente, foi projetado a confecção de um seguidor solar, o qual seria constituído por: 1) dispositivo de movimentação de eixos, composto por um motor de passo NEMA 23, juntamente com um driver Microstep; 2) dois sensores de luminosidade, sendo utilizados resistores dependentes de luz (LDR); e 3) unidade de controle, constituída por placa Arduino UNO, para fazer com que o plano de abertura da calha parabólica ficasse sempre perpendicular aos raios de luz incidentes. No entanto, tendo em vista a ocorrência de dano no motor de passo e o limitado recurso financeiro ainda disponível, optou-se pela realização do experimento de campo para avaliar a efetividade do pasteurizador sem o uso do seguidor solar.

3.2 O Arduino

Em termos de desenvolvimento do projeto, necessitou-se de uma plataforma que pudesse fornecer artifícios para realização e adequação dos dados e fornecimento de comandos em um só lugar. Com isso, o uso do Arduino® foi visto como solução viável, já que utiliza *hardware* e *software* de fonte aberta, o que permite utilizar códigos e esquemas eletrônicos livremente. Com o uso dessa plataforma, existe uma maior praticidade e rapidez no desenvolvimento do projeto, contudo, em projetos mais robustos é recomendável utilização de outras (McRoberts, 2018).

Na sua estrutura, o Arduino Uno (placa com USB de entrada), dispõe de quatorze portas digitais com seis delas sendo PWM, seis portas analógicas, conexão de alimentação a 5V e GND, fornecendo o aporte necessário para realização do projeto. Além disso, pode ser implementado acessórios, como, por exemplo, sensores de temperatura e válvulas solenóides, fornecendo assim um maior alcance de utilização da plataforma (McRoberts, 2018).

Para que o projeto se torne funcional, além da montagem dos componentes utilizados em uma protoboard, também é necessário utilizar o ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino (IDE), que é o *software* livre utilizado para escrita do código. Nesse editor de programa existe o carregamento de bibliotecas que fornece uma coleção de códigos

escritos por outra pessoa, oferecendo uma funcionalidade desejada para determinado equipamento utilizado (McRoberts, 2018).

Durante a implementação do código para o sistema de controle de vazão, necessitou-se de bibliotecas e de determinados comandos que fornecessem o funcionamento coeso de cada equipamento utilizado. Dessa forma, bibliotecas como: “<OneWire.h>” e “<DallasTemperature.h>”, que são responsáveis por estabelecer a comunicação com os sensores de temperatura, foram incrementadas no código principal. Além disso, deve-se lembrar das variáveis e dos determinados pinos (analógicos ou digitais) utilizados, assim, as válvulas solenóides e os termopares, que são importantes para o controle de vazão, podem ter o acionamento desejado (McRoberts, 2018).

É de importante conhecimento o uso da função “*void setup*”, onde o código é executado apenas uma vez, porém, ela fica responsável pela inicialização das portas analógicas ou digitais utilizadas, definição de entradas e saídas (INPUT/OUTPUT), definição de parâmetros iniciais, comunicação com o serial e por inicializar as bibliotecas. Sendo assim, sem essa função o código basicamente não funcionaria (McRoberts, 2018).

Após realizado todo o processo anterior, o código avança para o “*void loop*” que é responsável pela execução contínua do código enquanto o arduino® estiver ligado. Assim, cada declaração feita é executada, passo a passo, até que se chegue ao término, a partir daí o “*loop*” é reiniciado e assim é repetido até que se desligue o arduino® ou se tenha chegado ao objetivo (McRoberts, 2018).

3.3 O controle de vazão e a pasteurização

Para realizar o processo de inativação térmica de um patógeno é necessário conhecer o tempo mínimo necessário de exposição do micro-organismo, a uma temperatura específica. Levando em consideração esses parâmetros e a redução dos patógenos de forma satisfatória, consegue-se obter a curva de inativação, mostrada na Fig. 2, a qual é responsável por definir a pasteurização. A partir disso, pode-se estabelecer *set-points*, determinados pela Eq. (1), caracterizados como pontos de tempo e temperatura, que atuam em consonância para que seja alcançada a eliminação dos patógenos em questão, tais como *Escherichia coli*, coliformes e *Pseudomonas aeruginosa*, que são totalmente inativados para os *set-points*: 3600 s à 55°C; 2700 s à 60°C; 1800s à 65°C; 900 s à 75°C e 15 s à 85°C (Feachem *et al.*, 1983).

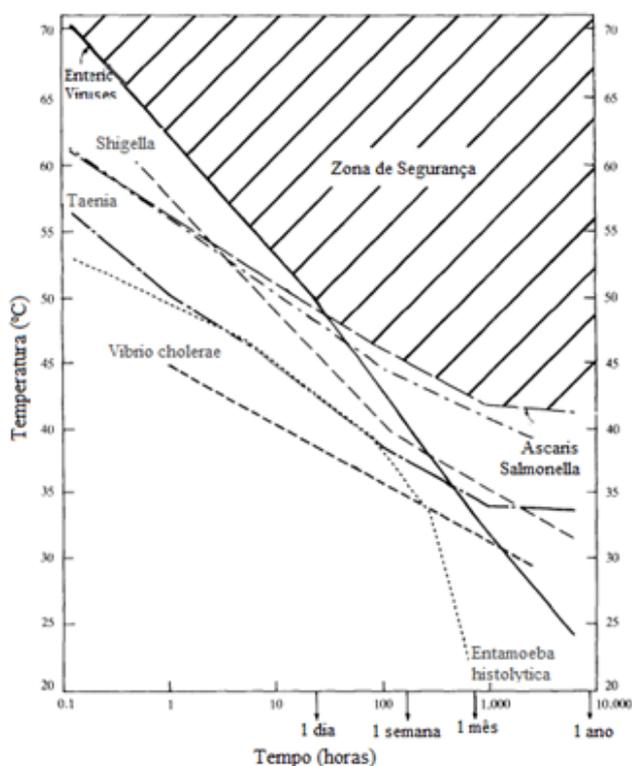


Figura 2 - Relação tempo x temperatura para inativação de patógenos. (Feachem, 1983) (Adaptado)

Dentre os micro-organismos analisados, quando submetidos a temperaturas mais elevadas, os enterovírus possuem uma maior resistência em relação aos demais, conforme mostrado anteriormente, sendo assim, a partir deles se delimita o parâmetro mínimo de desinfecção para inativação térmica. Dessa forma, a Eq. (1), a partir da curva de inativação e levando em consideração os *set-points*, dispõe o tempo de duração do tratamento dos patógenos (t), em função da temperatura (T) enquanto o mesmo ocorre. Com isso, estabeleceu-se uma relação matemática que demonstra o tempo mínimo necessário para inativação térmica dos enterovírus e dos demais micro-organismos (Hodgson, 2005).

$$t = 1,47 * 10^7 * e^{-0,265T} \quad (1)$$

Para a execução satisfatória do controle de vazão, é preciso evitar o contato da água não pasteurizada com a porção em pasteurização, como visto anteriormente, para não haver contato com os micro-organismos. Dessa forma, para que o controle seja estabelecido, torna-se necessário determinar a abertura e fechamento das válvulas solenóides e a leitura dos sensores termopar a prova d'água pelo Arduino® (Hodgson, 2005). Essa rotina pode ser visualizada no pseudocódigo mostrado na Fig. 3.

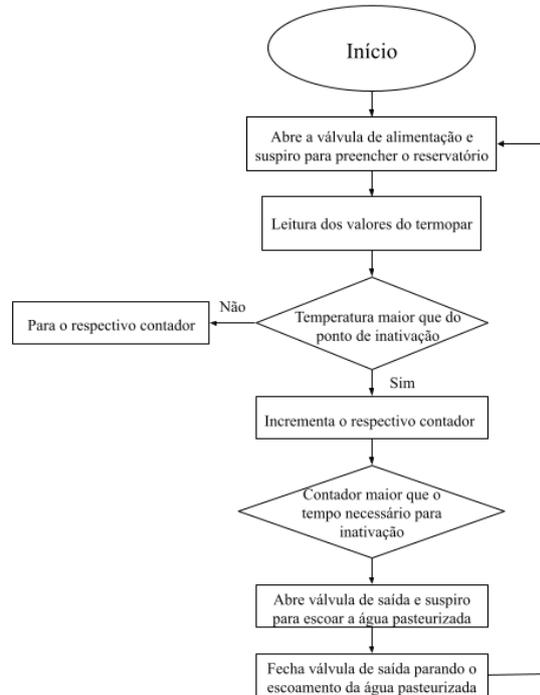


Figura 3 - Pseudocódigo de funcionamento do controle de vazão. (Autoria própria)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da efetividade do pasteurizador em campo foi realizada em dois momentos, ambos durante horário de sol mais alto (mais próximo ao zênite), a fim de facilitar o alinhamento manual do equipamento, tendo em vista a ausência do seguidor solar.

4.1 Primeiro experimento de campo

No primeiro dia de funcionamento do protótipo em campo, realizado no dia 08 de maio de 2023, o céu estava predominantemente limpo, com a irradiância total (direta + difusa) variando entre 1000 e 1100 W/m². Na Fig. 4, pode-se ver a temperatura dentro do tubo absorvedor em função do tempo, disposta em intervalos de 15 s.

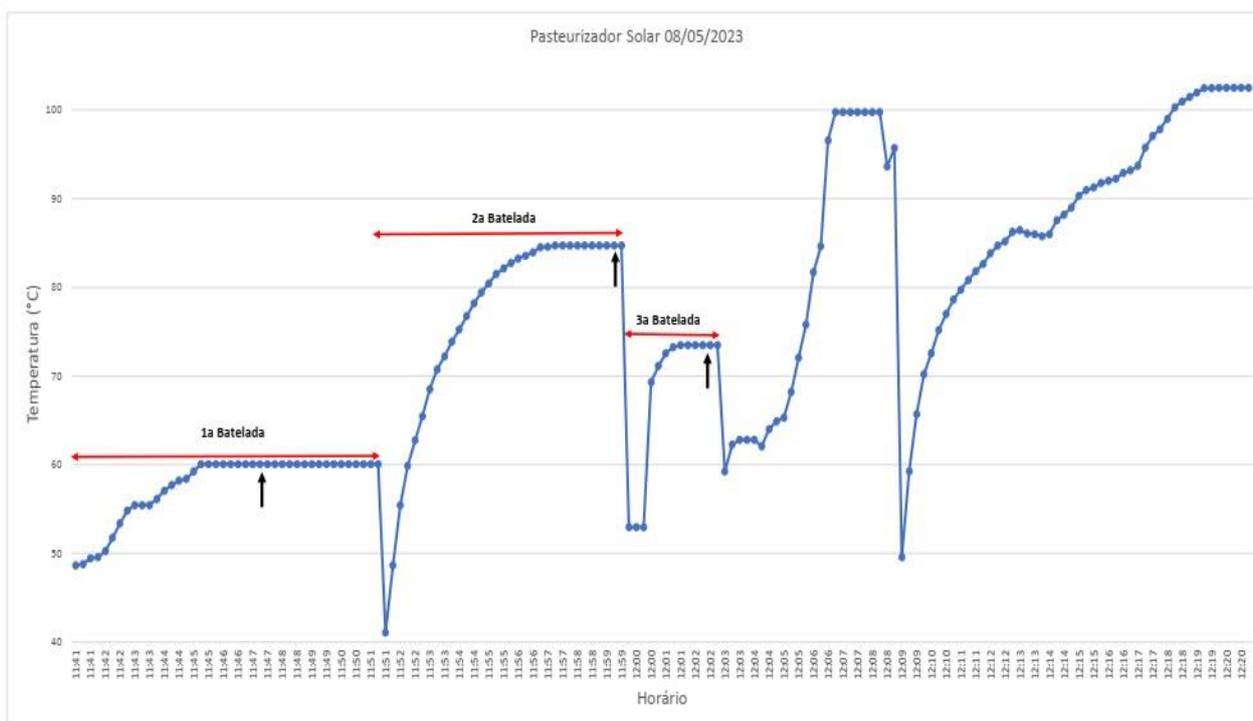


Figura 4 - Gráfico de temperatura x tempo do primeiro experimento de campo. (Autoria própria)

Os platôs que se observam no gráfico ao final de cada batelada, com a temperatura constante, não refletem a temperatura real, e sim a temperatura em que a válvula de saída abre para liberar a água já pasteurizada. Por um problema que ocorreu após uma mudança no código do sistema de controle de vazão, o valor armazenado em cada tomada de dados, enquanto a válvula de saída está aberta, é o mesmo de quando a válvula de saída é acionada para liberar a água. No entanto, as temperaturas que são críticas para o processo de pasteurização estão preservadas, ou seja, aquelas ao longo do intervalo em que a água está confinada no tubo absorvedor, quando todas as válvulas estão fechadas. O problema no código foi corrigido posteriormente.

A abertura da válvula de entrada, para o carregamento de uma nova carga de água contaminada em temperatura ambiente, ocorre após o fechamento da válvula de saída. Tal etapa do processo pode ser identificada no gráfico pela abrupta queda na temperatura no interior do tubo, refletindo o início de uma nova batelada. Após alguns segundos, a válvula de entrada e a do suspiro fecham e o sistema passa a contar o tempo, com o tempo de pasteurização sendo regido em função de uma determinada temperatura acima da qual a água permanece.

A duração das três primeiras bateladas é indicada pelas linhas vermelhas horizontais e o momento de coleta das amostras de água tratada durante o descarregamento do tubo em cada batelada é indicado pelas setas verticais pretas.

Após o primeiro carregamento de água, a válvula de saída abre às 11:45 quando a temperatura é de 60,06°C, por um erro no código. Para pasteurização a uma temperatura de 60 °C um tempo de aproximadamente uma hora é necessário, e a válvula abre após a água passar aproximadamente 4 minutos a temperaturas inferiores a essa. Como a temperatura continua a subir enquanto a água está saindo do tubo absorvedor, a temperatura dentro do tubo quando a água foi coletada era de 70° C (não mostrada no gráfico devido ao problema descrito acima). Nas duas bateladas seguintes, a temperaturas maiores, o sistema de controle se comportou como esperado e o tempo de confinamento da água foi o que deveria ser (o tempo de confinamento cai exponencialmente com a temperatura da água). As temperaturas eram de 84,7 °C e de 73,5 °C, respectivamente, no momento da coleta das amostras de água para a 2ª e 3ª bateladas. Apesar da duração da 3ª batelada parecer menor que a da 2ª batelada, apesar da temperatura menor dentro do tubo, essa diferença se deve à diminuição no sistema de controle do tempo de descarga do tubo, que pareceu demasiado longo durante as duas primeiras bateladas.

Após a terceira batelada e a coleta das três amostras de água pretendida para análise microbiológica, pode-se ver ainda uma quarta batelada e parte de uma quinta, durante a qual o sistema de vazão foi desligado e o comando para descarregar a água foi inserido manualmente no controle. Como a temperatura estava subindo muito rápido, parte da água estava evaporando dentro do tubo enquanto a água escoava para fora. Ocorrendo, assim, o problema oposto ao que ocorreu com a 1ª batelada, o sistema de controle demorou demais para abrir a válvula de saída, levando em conta os tempos de pasteurização muito curtos acima de 90 °C.

4.2 Análise microbiológica da água

A análise microbiológica da água, demonstrada na Tab. 1, foi realizada pelo Prof. Gustavo Rebouças juntamente à equipe do LIMNOAQUA – Laboratório de Limnologia e Qualidade de Água do Semi-Árido, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). A água contaminada para ser pasteurizada foi coletada junto à barragem do Rio Mossoró, no Centro de Mossoró, na manhã do mesmo dia, e armazenada em uma caixa d'água, que serviu de reservatório

superior de água contaminada. As amostras de água tratada no pasteurizador foram coletadas das três primeiras bateladas do pasteurizador do primeiro dia de experimento em campo. As amostras de controle foram retiradas diretamente da caixa d'água, que havia sido bem lavada antes de se colocar a água do rio nela.

Tabela 1 - Análise microbiológica da água do primeiro experimento de campo. (Autoria própria)

Análise Microbiológica (método 3 tubos)			
Amostras	Coliformes Totais, NMP/100mL	Coliformes Termotolerantes, NMP/100 mL	E. C, NMP/100 mL
Controle 1	>1100	240	93
Controle 2	>1100	240	240
Controle 3	>1100	240	93
Batelada 1	23	<3,0**	-
Batelada 2	<3,0*	-	-
Batelada 3	<3,0*	-	-

* menor valor provável conforme metodologia, entretanto cultura não turvou

** menor valor provável (limite de detecção do método). Cultura turvou, mas não reagiu positivo para Coliformes

- ensaios não foram feitos pois não deu positivo nos ensaios anteriores

Outras observações

No controle 1 apareceu provável presença de *Klebsiella pneumoniae* numa concentração de estimada 3,0 NMP/100 mL.

No Controle 3 provável presença de *Proteus mirabilis* ou *Salmonella typhimurium*, numa concentração de 6.2 NMP/100 mL

Para as três amostras de controle, o número de coliformes totais é maior do que o que pode ser determinado com precisão pelo método, com presença de um número expressivo de coliformes termotolerantes (fecais) e a presença da enterobactéria *E. coli*, indicando alta contaminação fecal da água.

Mesmo com o problema ocorrido com o sistema de vazão na batelada 1, o número provável de coliformes totais presentes após pasteurização foi muito reduzido, passando de mais de 1100 NPM/100 mL nas amostras de controle para 23 NPM/100 mL, não sendo detectados com o método coliformes fecais. Nas bateladas 2 e 3, nas quais o sistema de vazão funcionou da maneira esperada, ou seja, corretamente, não foi possível detectar coliformes totais com o método utilizado. Tal resultado caracteriza, pelo critério microbiológico, a potabilidade da água e demonstra que o equipamento é capaz de pasteurizá-la.

4.3 Segundo experimento de campo

No segundo experimento de campo, realizado no dia 27 de setembro de 2023, na maior parte do tempo, o céu estava predominantemente limpo, com a presença de nuvens apenas no início de seu desenvolvimento, com irradiação total (direta+difusa) variando entre 950 e 1100 W/m². Na Fig. 5, pode-se ver a temperatura dentro do tubo absorvedor e a irradiação em função do tempo, disposta em intervalos de 20 min, por envolver um maior conjunto de valores em um maior espaço de tempo.

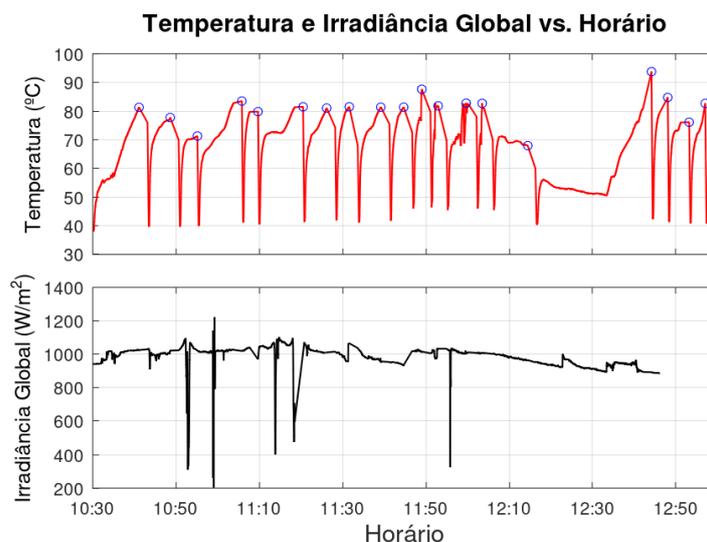


Figura 5 - Gráficos de Temperatura(°C) e Irradiância Global(W/m²) x Horário. (Autoria própria)

Com o código corrigido, pode-se perceber uma diferença no comportamento gráfico, tendo em vista que a temperatura, neste caso, continua a ser exibida, pois os contadores respectivos de cada *set-point* eram responsáveis por

liberar a água e consequentemente finalizar o processo de pasteurização. Assim, não houve “pausa” na leitura da temperatura durante a execução do código, como aconteceu anteriormente.

Para uma melhor identificação, colocou-se um círculo azul indicando o término de uma batelada e o início da outra. Dessa maneira, pode-se perceber que ocorreram 19 bateladas no total, entretanto, é notório que no espaço de tempo entre 12:20 e 12:40 há um intervalo maior, devido o realinhamento e mudança de posição da calha parabólica, pela ocorrência de um sombreamento indesejado enquanto se faziam as medidas, resultando em uma certa disparidade no comportamento do gráfico em relação aos horários anteriores e posteriores.

Em relação aos valores da irradiância global, captados pelo piranômetro Instrutherm MES-200, faz-se necessário comentar sobre os “vales” que apareceram repentinamente durante a amostragem de dados e realização experimental. Esse fato aconteceu devido à ocasional passagem de nuvens pelo local do experimento, reduzindo drasticamente a irradiância medida, mas por pouco tempo. Além disso, quando se estava finalizando, especificamente nas três últimas bateladas, o aparelho descarregou, resultando na ausência dos dados. Entretanto, os valores de temperatura não sofreram alteração devido ao acontecimento, como se pode ver no gráfico mostrado na Fig. 5.

Em consonância aos registros da Fig. 5, na Tab. 2 estão dispostos os valores referentes à energia incidente na área de abertura do concentrador durante a duração de cada batelada, que pode ser encontrada pelo produto da irradiância, pelo tempo e pela área de abertura do concentrador, tomado a cada 2 s, e então somando-se ao longo de toda a duração da batelada. Dessa forma, com os valores dispostos, além de se encontrar a energia incidente em cada batelada, também se pode ter acesso ao tempo médio de cada batelada, onde foi encontrado um valor em torno de 7,73 minutos, encontrando assim informações que corroboram para o aproveitamento energético do sistema durante o experimento.

Tabela 2 - Amostragem de energia incidente e tempo, em minutos, de cada batelada. (Autoria própria)

ENERGIA INCIDENTE DURANTE CADA BATELADA (JOULES)	TEMPO DE CADA BATELADA (EM MINUTOS)
1,53E+06	11,00
7,36E+05	7,48
5,44E+05	6,53
1,19E+06	10,67
2,40E+05	3,87
1,23E+06	10,83
7,77E+05	5,65
4,45E+05	5,43
7,33E+05	7,57
4,33E+05	5,50
3,04E+05	4,35
2,44E+05	3,92
6,33E+05	6,72
2,30E+05	3,85
1,20E+06	10,95
3,36E+06	29,70
Não aplicável	3,90
Não aplicável	5,13
Não aplicável	3,87

Quanto à produtividade do protótipo, vê-se que esta é definida como a quantidade de água tratada durante o tempo de operação do sistema. Sendo assim, buscando tal análise referente ao modelo testado neste estudo, observou-se a pasteurização de 1400ml de água durante as 2 horas e 20 minutos de experimento. Porém, tal achado ficou aquém do esperado, o qual seria de 8550ml de água, já que o tubo receptor escoaria os 450ml durante cada uma das 19 bateladas. A explicação para o ocorrido se baseia no comprometimento do escoamento da água, pelo fato da válvula na abertura do suspiro não deixar o ar entrar no tubo durante o escoamento da água. A válvula usada é uma válvula de água unidirecional,

que deixa a água passar em uma única direção, mas aparentemente também não deixa o ar passar na direção oposta. O fato de não se conseguir escoar de maneira eficiente a água já pasteurizada comprometeu a produtividade do protótipo.

Ao analisar outros estudos desenvolvidos para avaliar a produtividade de pasteurizadores solares, é possível fazer um comparativo. O presente trabalho identificou, a partir do protótipo de pasteurizador elaborado, uma produtividade média no segundo dia de experimento de 600ml/h, com a marca de 19 bateladas alcançadas em 2 horas e 20 minutos de experimento, pasteurizando cerca de 73,6 ml de água por batelada. Durante seu experimento com duração de oito horas, alcançou-se o número máximo de oito bateladas, tratando, em cada uma destas, cerca de 1,8L de água (Da Silva; Tiba; Calazans, 2016). De modo semelhante, Da Silva *et al.* (2017), em nove horas, atingiu número máximo de bateladas de 34, com pasteurização de 2L de água em cada uma destas. Tais trabalhos apresentam um modelo de controle semelhante ao protótipo do presente estudo, havendo isolamento entre a água contaminada e a tratada. A partir do exposto é possível identificar um volume de água tratada inferior ao que a literatura expõe em outros trabalhos, no entanto, tal achado se deve ao caráter unidirecional da válvula de suspiro, se esta estivesse em funcionamento ideal o volume de água pasteurizada por batelada seria de 450ml, com um aumento em torno de 610% na produtividade final do sistema.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo buscou avaliar a operação e a caracterização de um pasteurizador solar automatizado de calha parabólica, com foco no controle de vazão. O equipamento foi projetado visando a descontaminação microbiológica da água, de modo a mitigar o acesso precário à água potável para o consumo humano em regiões onde só fontes inseguras de água estão disponíveis e onde a população não tem acesso à rede elétrica ou combustíveis para realizar essa descontaminação.

Desta forma, no primeiro experimento de campo, buscou-se fazer uma análise microbiológica, visando estabelecer a eficácia na inativação, além de atestar o pleno funcionamento do código. Neste primeiro teste, o código do controle de vazão apresentou falhas durante a experimentação em campo, porém, não impactou nos resultados relacionados à microbiologia, alcançando assim, a inativação dos micro-organismos na água testada de maneira satisfatória.

Após os resultados do primeiro teste em campo, mesmo a análise microbiológica atestando satisfatoriamente a inativação dos micro-organismos, procurou-se um melhoramento do código, buscando evitar falhas durante outras experimentações. Com isso, o código foi alterado e o segundo teste em campo constatou a melhora no funcionamento, pois operou de maneira ininterrupta durante 2 horas e 20 minutos, alcançando 19 bateladas nesse intervalo, dessa forma, a operacionalização do controle de vazão e a busca pela inativação dos micro-organismos corroboraram positivamente para os objetivos.

Apesar de se ter alcançado resultados satisfatórios, para a continuidade e futuros testes, precisa-se aprimorar a operacionalização, o incremento do seguidor, a fim de diminuir a falha humana durante a experimentação, o melhoramento do controle de vazão adicionando uma válvula bidirecional à abertura do suspiro e o melhoramento do manejo do concentrador, já que é um objeto grande e de difícil locomoção.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. Agradeço primeiramente a Deus, por todas as bênçãos e conquistas, em segundo, ao meu orientador, pois, seu apoio e conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo. Também expressei meu reconhecimento a Universidade Federal Rural do Semi-Árido por todo apoio e espaço acadêmico, tornando esse projeto possível. Além disso, agradeço à minha família, em especial à minha mãe, minha namorada e amigos pelo constante incentivo e compreensão durante os desafios enfrentados. Este trabalho não teria sido possível sem o apoio e encorajamento de todos vocês.

REFERÊNCIAS

- Abdulhamed, Ali Jaber et al. Review of solar parabolic-trough collector geometrical and thermal analyses, performance, and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 91, p. 822-831, 2018.
- Abraham, J. P.; Plourde, B. D.; Minkowycz, W. J. Continuous flow solar thermal pasteurization of drinking water: methods, devices, microbiology, and analysis. *Renewable Energy*, v. 81, p. 795-803, 2015.
- Acra, A.; Raffoul, Z.; Karahagopian, Y. Solar Disinfection of Drinking Water and Oral Rehydration Solutions - Guidelines for Household Application in Developing Countries. UNICEF, American University of Beirut. 1984.
- Bindu, M. V.; Joseline Herbert, G. M. Applications of Parabolic Trough Concentrating Technology: A Review. In: *International Conference on Automation, Signal Processing, Instrumentation and Control*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2020. p. 361-370.
- Burch, Jay; Thomas, Karen E. An overview of water disinfection in developing countries and the potential for solar thermal water pasteurization. *National Renewable Energy Lab*. 1998.
- Da Silva, Gustavo Carielo et al. Solar water pasteurizer: Productivity and treatment efficiency in microbial decontamination. *Renewable Energy*, v. 105, p. 257-269, 2017.

- Da Silva, Gustavo Carielo; Tiba, Chiguereu; Calazans, Glícia Maria Torres. Solar pasteurizer for the microbiological decontamination of water. *Renewable Energy*, v. 87, p. 711-719, 2016.
- Dutta, Partha Pratim et al. Modeling and performance evaluation of a small solar parabolic trough collector (PTC) for possible purification of drained water. *Materials Today: Proceedings*, v. 47, p. 4226-4234, 2021.
- Ehrenberg, John P. et al. Efforts to mitigate the economic impact of the COVID-19 pandemic: potential entry points for neglected tropical diseases. *Infectious diseases of poverty*, v. 10, n. 01, p. 4-13, 2021.
- Ellis, K. V. Water disinfection: A review with some consideration of the requirements of third world. *Crit Rev Env Contr*, v. 20, n. 5, 6, p. 341–407.1991.
- Feachem, Richard G. et al. Sanitation and disease: health aspects of excreta and wastewater management. New York: Wiley, 1983.
- Fernández-García, A. et al. Parabolic-trough solar collectors and their applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 14, n. 7, p. 1695-1721, 2010.
- Hajissa, Khalid et al. Prevalence of intestinal protozoan parasites among school children in africa: A systematic review and meta-analysis. *PLoS neglected tropical diseases*, v. 16, n. 2, p. e0009971, 2022.
- Hodgson, David A. Design of and Experimentation with a Passive Valve-less Flow-through Solar Water Pasteurization System. 2005. Tese de Doutorado. Colorado State University.
- Hussein, Ahmed Kadhim et al. A review of nano fluid role to improve the performance of the heat pipe solar collectors. *Energy Procedia*, v. 109, p. 417-424, 2017.
- Jardin, Tarciso Dal Maso. A governança internacional para o desenvolvimento sustentável: ECOSOC, Comissão de desenvolvimento sustentável, PNUMA. Núcleo de Estudos e Pesquisa, 2012.
- Javadi, F. Sarrafzadeh; Saidur, R.; Kamalifarvestani, M. Investigating performance improvement of solar collectors by using nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 28, p. 232-245, 2013.
- Jebasingh, V. K.; Herbert, GM Joselin. A review of solar parabolic trough collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 54, p. 1085-1091, 2016.
- Kapoor, Karan et al. Evolution of solar energy in India: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 40, p. 475-487, 2014.
- Maia, Ivan Luis Barbalho. O acesso à água potável como direito humano fundamental no direito brasileiro. *Revista do CEPEJ*, n. 20, 2017.
- McRoberts, Michael. Arduino básico. Novatec Editora, 2018.
- Razzolini, M. T. P.; Günther, W. M. R.. Impactos na saúde das deficiências de acesso a água. *Saúde e Sociedade*, v. 17, n. 1, p. 21–32, jan. 2008.
- Singh, Raman Kumar; Chandra, Prakash. Parabolic trough solar collector: A review on geometrical interpretation, mathematical model, and thermal performance augmentation. *Engineering Research Express*, 2023.
- United Nations - UN. Human Rights. Office of the High Commissioner for Human Rights, Monitoring the economic, social and cultural rights. Disponível em: <http://www.ohchr.org/EN/HRBodies/CESCR/Pages/CESCRIntro.aspx> Acesso em: 03 out. 2023.
- University of Dhaka. Looking for safe drinking water? – Techniques using free sunshine and rain. Department of Biomedical Physics & Technology. Dhaka, Bangladesh. 2011. Disponível em: <http://bmpt.du.ac.bd/wpcontent/uploads/2012/04/bookletonsafedrinkingwaterusingsimpletechniques.pdf> Acessado: 01 Out 2023.
- Verma, Sujit Kumar; Tiwari, Arun Kumar. Progress of nanofluid application in solar collectors: a review. *Energy Conversion and Management*, v. 100, p. 324-346, 2015.
- Xia, Xintao; Xia, Junzi. Evaluation of potential for developing renewable sources of energy to facilitate development in developing countries. In: 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. IEEE, 2010. p. 1-3.
- WHO. Water Sanitation Health: Guidelines for drinking-water quality. Fourth edition. Chapter 7 and 11. 2011. Disponível em: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151_eng.pdf Acessado: 05 set 2023.

FIELD TESTS OF A SOLAR PASTEURIZER PROTOTYPE WITH AUTOMATED FLOW CONTROL

Abstract. *Faced with the challenge of access to quality drinking water, faced in many regions of the world, and in order to maximize the use of energy from renewable sources, the use of a solar pasteurizer is seen as a viable instrument, as it performs microbiological decontamination of water. using solar radiation. Therefore, the present study sought to evaluate the operation and characterization of an automated parabolic trough solar pasteurizer. This is quantitative, experimental and descriptive research, with field tests involving the analysis of the effectiveness and productivity of the system. In these, it was possible to attest to the effectiveness of the prototype in terms of inactivating pathogens present in the water, making it suitable for human consumption, as well as being able to operate the flow control uninterruptedly for a few hours, carrying out a total of 19 batches in just over a period of time. two hours of operation.*

Keywords: *Solar Pasteurization, Solar Water Purification, Microbiological Water Decontamination*