

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ CENTRO DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LINO WAGNER CASTELO BRANCO PORTELA

ANÁLISE ENERGÉTICA E DESEMPENHO DE UM COLETOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO AUXILIADO POR SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR APLICADO NO PROCESSO DE DESSALINIZAÇÃO TÉRMICA

FORTALEZA 2020

LINO WAGNER CASTELO BRANCO PORTELA

ANÁLISE ENERGÉTICA E DESEMPENHO DE UM COLETOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO AUXILIADO POR SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR APLICADO NO PROCESSO DE DESSALINIZAÇÃO TÉRMICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Orientadora: Prof^a. Dra. Ana Fabíola Leite Almeida.

Coorientadores: Prof. Dr. Kleber Lima Cezar e Prof. Me. Erilson de Sousa Barbosa.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação Universidade Federal do Ceará Biblioteca Universitária Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P877a Portela, Lino Wagner Castelo Branco.

Análise energética e desempenho de um coletor solar cilíndrico parabólico auxiliado por sistema de rastreamento solar aplicado no processo de dessalinização térmica / Lino Wagner Castelo Branco Portela. – 2020.

56 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2020. Orientação: Profa. Dra. Ana Fabíola Leite Almeida.

1. Energia solar. 2. Potencial energético. 3. Concentrador solar parabólico. 4. Rastreamento solar. 5. Dessalinização. I. Título.

CDD 620.1

LINO WAGNER CASTELO BRANCO PORTELA

ANÁLISE ENERGÉTICA E DESEMPENHO DE UM COLETOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO AUXILIADO POR SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR APLICADO NO PROCESSO DE DESSALINIZAÇÃO TÉRMICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em 28/04/2020

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Ana Fabíola Leite Almeida (Orientadora) Universidade Federal do Ceará (UFC)

> Prof. Dr. Manuel Pedro Fernandes Graça Universidade de Aveiro (UA)

Prof. Dr. Kleber Lima Cézar (Coorientador) Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Prof. Me. Erilson de Sousa Barbosa (Coorientador) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Elissandro Monteiro do Sacramento Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre me conduzir ao melhor caminho, mantendo-me seguro e confiante para superar todas as adversidades.

À minha mãe, Rosemary, por estar sempre ao meu lado, pelo seu amor e pelas cobranças que me fazem ser alguém melhor a cada dia.

Ao meu pai Lino, pela demonstração de apoio e de otimismo para que eu consiga alcançar todos os meus objetivos.

Ao meu avô, Lourival Almeida (*in memoriam*), por ter sido um grande amigo e ter me ajudado nos momentos mais difíceis.

Aos meus irmãos, Leonardo e Fabíola, por serem exemplo de dedicação e de companheirismo e pela compreensão.

Aos meus sobrinhos, João Gabriel e Heitor, por serem incentivo a mais para superação de novos desafios.

À minha namorada, Ana Karolyna, pelo seu amor e por ser minha companheira, estando sempre presente e disposta a ajudar na superação de todos os obstáculos.

À UFC pela experiência acadêmica de pós-graduação e por ter me proporcionado o desenvolvimento de novos conhecimentos.

À UFPI pela utilização de laboratório e também ao técnico do Laboratório de Usinagem, Patrick Abreu, pela contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

À minha orientadora, professora Fabíola, e aos professores Erilson Barbosa e Kleber Lima, por terem me ajudado da melhor maneira possível, estando sempre disponíveis e motivados a desenvolver este trabalho.

Aos amigos de turma, que sempre estiveram dispostos à colaborarem na pesquisa como também na minha adaptação à cidade de Fortaleza.

Ao amigo Brandão, um senhor de estimada sabedoria, por ter me acolhido e ajudado sempre com grande carinho.

Ao secretário de pós-graduação, Valdi, pelo comprometimento e pela disponibilidade para estar sempre ajudando.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo fomento da pesquisa através do edital Nº 18/2013 MCTI/CNPq/SPM-PR/Petrobras.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

No Brasil e em países que estão com economia em desenvolvimento, é tendência que neles ocorram grandes investimentos na aplicação de fontes renováveis de energia. Isso tem acontecido devido ao crescimento da demanda por energia, principalmente pelo aumento populacional e pela evolução das atividades industriais. Além disso, outro grave problema relacionado a esse tema é o acesso à água potável pela população, sobretudo em estados da região do semiárido brasileiro (AL, BA, CE, PB, PE, PI, RN, SE, MA e MG). Diante desse contexto, e considerando o potencial energético desses estados, a energia solar representa uma das fontes renováveis viáveis para aproveitamento nessas regiões. Ela pode ser aproveitada com a utilização de concentradores solares que são comumente utilizados em sistemas solares térmicos nos quais o fluido de trabalho atinja elevadas temperaturas (60°C a 400°C). Esta pesquisa analisou a influência energética da tecnologia Concentrador Solar Parabólico auxiliado por um sistema de rastreamento solar em um processo de dessalinização de água. Neste trabalho, foi analisado os dados coletados através de sensores de temperatura fixados na superfície externa ao longo do absorvedor localizado no foco da calha parabólica de um concentrador solar parabólico desenvolvido para fornecer energia a um dessalinizador térmico, e também, pelo sensor de radiação solar (piranômetro), colocado na estrutura do concentrador. Além desses sensores, o sistema de concentração solar foi auxiliado por um mecanismo de rastreamento solar que foi responsável por manter sempre o coletor de radiação solar em posição de aproveitamento máximo dos raios solares. O concentrador apresentou uma eficiência óptica de aproximadamente 81%, conseguiu atingir valores de eficiência térmica média entre 21,8% e 24,7% sob condições de radiação solar máxima de 990 W/m². A taxa de produção de água dessalinizinada foi estimada a alcançar valores médios de 68,67 ml/min e 82,10 ml/min, sendo capaz de proporcionar produção média de 24,63 litros de água dessalinizada por dia.

Palavras-chave: Energia solar. Potencial energético. Concentrador solar parabólico. Rastreamento solar. Dessalinização.

ABSTRACT

In Brazil and in countries that are developing economies, there is a tendency for them to invest heavily in the application of renewable energy sources. This has happened due to the growth in demand for energy, mainly due to the increase in population and the evolution of industrial activities. In addition, another serious problem related to this theme is access to drinking water by the population, especially in states in the Brazilian semi-arid region (AL, BA, CE, PB, PE, PI, RN, SE, MA and MG). In this context, and considering the energy potential of these states, solar energy represents one of the viable renewable sources for use in these regions. It can be used with the use of solar concentrators that are commonly used in solar thermal systems in which the working fluid reaches high temperatures (60°C to 400°C). This research analyzed the energetic influence of the Parabolic Solar Concentrator technology aided by a solar tracking system in a water desalination process. In this work, the data collected through temperature sensors fixed on the external surface along the absorber located in the focus of the parabolic trough of a parabolic solar concentrator developed to supply energy to a thermal desalinator, and also by the solar radiation sensor (pyranometer), placed on the structure of the concentrator. In addition to these sensors, the solar concentration system was assisted by a solar tracking mechanism that was responsible for always keeping the solar radiation collector in a position of maximum use of the sun's rays. The concentrator had an optical efficiency of approximately 81%, reaching average thermal efficiency values between 21.8% and 24.7% under conditions of maximum solar radiation of 990 W/m². The rate of production of desalinated water was estimated to reach average values of 68.67 ml/min and 82.10 ml/min, being able to provide an average production of 24.63 liters of desalinated water per day.

Keywords: Solar Energy. Energetic Potential. Parabolic Solar Concentrator. Solar Tracking. Desalination. Energy Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Irradiação solar direta normal anual com destaque para regiões com maior poteno	cial
de aproveitamento da energia solar concentrada	16
Figura 2 - Processos de dessalinização	20
Figura 3 - Esquema convencional de um dessalinizador por simples efeito	21
Figura 4 - Dessalinizador de múltiplos efeitos	22
Figura 5 - Dessalinizador de múltiplos estágios <i>flash</i>	23
Figura 6 - Esquema de um dessalinizador por umidificação-desumidificação	24
Figura 7 – Esquema de um concentrador solar cilíndrico parabólico	25
Figura 8 - Seção transversal de um concentrador cilíndrico parabólico	26
Figura 9 - Sistema de rastreamento solar	28
Figura 10 - Balanço de energia e modelo de resistência térmica	33
Figura 11 - Concentrador solar cilíndrico parabólico	40
Figura 12 - A superfície de um LDR	41
Figura 13 - Módulo de sensores de luminosidade	41
Figura 14 - Fluxograma referente à lógica de programação	42
Figura 15 - Localização dos termopares e do piranômetro	43
Figura 16 - Datalogger modelo A202 (Contemp TM)	44
Figura 17 - Motor de passo bipolar (86BHH1500-424E-37BS)	45
Figura 18 - Driver modelo TB6560	45
Figura 19 - Radiação solar e temperatura com muitas nuvens	46
Figura 20 - Radiação solar e temperatura com a presença de nuvens em intervalos menores	47
Figura 21 - Eficiência térmica do concentrador solar com muitas nuvens	48
Figura 22 - Eficiência térmica do concentrador com a presença de nuvens em interva	llos
menores	48
Figura 23 - Taxa estimada de produção de água dessalinizada sob muitas nuvens	49
Figura 24 - Taxa estimada de produção de água dessalinizada sob a presença de nuvens	em
intervalos menores	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Termos do balanço de energia	
Quadro 2 - Fatores de correção	
Quadro 3 - Estimativas de eficiência na análise óptica	

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica			
IEA	International Energy Agency (Agência Internacional de Energia)			
LiBr-H ₂ O	Solução Salina Brometo de Lítio e Água			
SED	Simple Effect Distillation (Destilação por Simples Efeito)			
MED	Multieffect Distillation (Destilação por Multi-Efeitos)			
MSF	Multistage Distillation Flash (Destilação Flash por Multi-Estágios)			
HDH	Humidification-Dehumidification Desalination (Dessalinização por			
	Umidificação-Desumidificação)			
MVC	Mechanical Vapour Compression (Compressão Mecânica de Vapor)			
TVC	Thermal Vapour Compression (Compressão Térmica de Vapor)			
MD	D Membrane Distillation (Destilação por Membrana)			
FO	Forward Osmosis (Osmose Direta)			
RO	RO <i>Reverse Osmosis</i> (Osmose Reversa)			
ED	Electrodialysis Desalination (Dessalinização por Eletrodiálise)			
NF	Nano Filtration (Nano Filtração)			
AISI	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano do Ferro e do Aço)			
LDR	Light Depedent Resistor (Resistor Dependente de Luz)			
CdS	Sulfeto de Cádmio			
CdSe	Seleneto de Cádmio			
ppm	Partes por milhão			

LISTA DE SÍMBOLOS

F	Ponto focal do concentrador [mm]
$arphi_{ m r}$	Ângulo de abertura do concentrador [°]
r	Raio de abertura do concentrador [mm]
a	Largura do concentrador [mm]
D	Diâmetro mínimo do tubo absorvedor [mm]
f	Distância do ponto focal ao centro da parábola [mm]
х	Distância entre o centro da parábola a outro próximo ao ponto focal [mm]
c	Razão de concentração do concentrador
W	Tamanho teórico da imagem no plano focal do concentrador [mm]
Q _{rad}	Taxa de transferência de calor por radiação [W]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [W/(m ² .K ⁴)]
А	Área de transferência de calor [m ²]
ε	Emissividade
T_s	Temperatura da superfície [K]
T_{viz}	Temperatura da vizinhança [K]
α	Absortividade
ρ	Refletividade
τ	Transmissividade
Q _{conv}	Taxa de transferência de calor por convecção [W]
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m².K]
A_s	Área de transferência de calor [m ²]
T_{∞}	Temperatura do fluido suficientemente longe da superfície
Q _{cond}	Taxa de transferência de calor por condução [W]
k	Condutividade térmica [W/m.K]
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura [K/m]
\dot{Q}_{ev}	Taxa de transferência de calor por evaporação [W]
h _{ev}	Coeficiente de transferência de calor por evaporação [W/m².K]
ΔT	Variação de temperatura [K]
Żc	Taxa de transferência de calor por condensação [W]
h _c	Coeficiente de transferência de calor por condensação [W/m².K]
T _{sat}	Temperatura de saturação [K]

m _c	Vazão mássica de condensação [kg/s]		
h _{fg}	Calor latente de vaporização [J/kg]		
q _{1conv}	Fluxo de calor por convecção entre a superfície interna do tubo absorvedor e o		
	fluido de trabalho [W/m]		
ḋ₁ _{cond}	Fluxo de calor por condução entre a superfície externa do tubo absorvedor e a		
	superfície interna do tubo absorvedor [W/m]		
q _{Sol}	Fluxo de calor por irradiação solar absorvida entre a incidência de irradiação		
	solar e a superfície externa do tubo absorvedor [W/m]		
ġ₂ _{conv}	Fluxo de calor por convecção entre a superfície externa do tubo absorvedor e o		
	ambiente [W/m]		
q _{rad}	Fluxo de calor por radiação entre a superfície externa do tubo absorvedor e o		
	ambiente [W/m]		
q _{2cond,est}	Fluxo de calor por condução entre a superfície externa do tubo absorvedor e o		
	suporte de fixação do coletor [W/m]		
q _{perda}	Fluxo de calor por radiação e convecção entre o coletor cilíndrico parabólico e		
	o ambiente [W/m]		
D _{int}	Diâmetro interno do tubo		
h ₁	Coeficiente de transferência de calor por convecção do fluido [W/m².K]		
k ₁	Condutividade térmica do fluido [W/m.K]		
π	Número Pi		
T _{int}	Temperatura da superfície interna do absorvedor [K]		
T _{med1}	Temperatura média do fluido de trabalho [K]		
Nu _{Dint}	Número de Nusselt com base no <i>D_{int}</i>		
f _{int}	Fator de atrito para a superfície interna do tubo absorvedor		
Re _{Dint}	Número de Reynolds com base no D _{int}		
Pr _{med1}	Número de Prandtl para a temperatura média do fluido de trabalho		
<i>Pr_{int}</i>	Número de Prandtl em relação a temperatura da superfície interna do tubo		
T _{ext}	Temperatura externa da superfície do tubo absorvedor [K]		
k _{med}	Condutividade térmica para a temperatura média entre a temperatura interna da		
	superfície do tubo e a temperatura externa da superfície do tubo [W/m.K]		
D _{ext}	Diâmetro externo do tubo absorvedor [mm]		
h ₂	Coeficiente de transferência de calor por convecção do ar [W/m ² .K]		
T _{amb}	Temperatura ambiente [K]		

Nu _{Dext}	Número de Nusselt com base no diâmetro externo do tubo absorvedor		
<i>k</i> ₂	Condutividade térmica do ar para temperaturas entre T_{ext} e T_{amb} [W/m ² .K]		
Ra _{Dext}	Número de Rayleigh com base no diâmetro externo do tubo absorvedor		
g	Constante gravitacional [m/s ²]		
α1	Difusividade térmica para a temperatura do filme da superfície do tubo		
	absorvedor [m ² /s]		
β	Coeficiente volumétrico de expansão térmica [1/K]		
Pr ₂	Número de Prandtl em relação a temperatura do filme da superfíc		
	absorvedor		
v_1	Viscosidade cinemática para o ar na temperatura do filme da superfície do		
	absorvedor [m ² /s]		
T_f	Temperatura do filme da superfície do absorvedor [K]		
С	Fator de correção		
m	Fator de correção		
n	Fator de correção		
Re _{Dext}	Número de Reynolds com base no D_{ext}		
<i>Pr_{amb}</i>	Número de Prandtl em relação a temperatura ambiente		
Pr _{ext}	Número de Prandtl em relação a temperatura externa na superfície do		
	absorvedor		
ε ₁	Emissividade da superfície externa do tubo absorvedor		
T_a	Temperatura efetiva do ambiente [K]		
Р	Perímetro da seção transversal do suporte de fixação [m]		
<i>k</i> ₃	Coeficiente de condutividade térmica do suporte de fixação [W/m ² .K]		
<i>A</i> ₃	Área de seção transversal do suporte de fixação [m²]		
<i>T</i> ₃	Temperatura na superfície do suporte de fixação [K]		
L _t	Comprimento do tubo absorvedor [m]		
h_3	Coeficiente de transferência de calor por convecção do ar [W/m².K]		
ġ₅	Quantidade de radiação solar por comprimento do tubo absorvedor [W/m]		
α_a	Absortividade do tubo absorvedor		
η_a	Eficiência óptica do tubo absorvedor		
ε _a	Estimativa de eficiência óptica considerando a presença de nuvens		
ε_b	Estimativa do erro no rastreamento		
ε _c	Estimativa do erro de alinhamento do coletor solar		

\mathcal{E}_d	Estimativa da presença de pequenas partículas na superfície refletora		
ε _e	Estimativa da presença de pequenas partículas na superfície do tubo absorvedor		
\mathcal{E}_{f}	Estimativa de possíveis perdas não identificadas		
Κ	Modificação do ângulo de incidência da radiação		
$ ho_1$	Refletância da superfície refletora		
η _t	Eficiência térmica		
Ż _{útil}	Taxa de transferência de energia na forma de calor útil [W]		
Ι	Taxa de radiação solar que incide sobre a superfície de abertura do		
	concentrador solar parabólico [W]		
C _{med}	Calor específico médio do fluido de trabalho [J/kg.K]		
<i>m</i> ′	Massa específica do fluido de trabalho [kg/m³]		
T _{ent}	Temperatura de entrada do fluido de trabalho no sistema [K]		
T _{sai}	Temperatura de saída do fluido de trabalho no sistema [K]		
G	Valor de irradiação total no sistema [W/m ²]		
A _a	Área de abertura do coletor solar [m²]		
T1	Temperatura de entrada do fluido de trabalho [°C]		
Т5	Temperatura de saída do fluido de trabalho [°C]		
ТМ	Temperatura média na superfície do tubo absorvedor [°C]		

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1	Dessalinizadores	20
3.1.1	Dessalinização por Simples Efeito	21
3.1.2	Dessalinização por Múltiplos Efeitos	22
3.1.3	Dessalinização por Múltiplos Estágios Flash	23
3.1.4	Dessalinização por Umidificação-Desumidificação	24
3.2	Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico	25
3.3	Rastreamento da Radiação Solar	28
3.4	Transferência de Calor e Massa	29
3.4.1	Radiação	29
3.4.2	Convecção	30
3.4.3	Condução	30
3.4.4	Evaporação	31
3.4.5	Condensação	31
3.5	Balanço de Energia no Coletor Solar	32
3.5.1	Convecção entre a superfície interna do tubo absorvedor e o fluido de trabalho	34
3.5.2	Condução entre a superfície externa e interna do tubo absorvedor	35
3.5.3	Convecção entre a superfície externa do tubo absorvedor e o ambiente	35
3.5.4	Radiação entre a superfície externa do tubo absorvedor e o ambiente	37
3.5.5	Condução entre a superfície externa do tubo absorvedor e o suporte de fixaçã	o do
	coletor cilíndrico parabólico	37
3.5.6	Irradiação solar no tubo absorvedor	38
3.5.7	Perda de fluxo de calor	38

3.5.8	Eficiência Térmica	
4	MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1	O Concentrador Solar Parabólico	40
4.2	O Sistema de Rastreamento Solar	40
4.3	Os Sensores e a Instrumentação para Aquisição de Dados	43
4.4	Motor de Passo	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
6	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	

1 INTRODUÇÃO

No Brasil e em países como Alemanha, China, Espanha, Estados Unidos, entre outros, ao longo dos últimos anos, tem sido realizado grandes investimentos para o desenvolvimento de sistemas que utilizam fontes energéticas renováveis – energia solar, biomassa e energia eólica (IEA, 2017). As fontes renováveis, quando comparadas às convencionais (gás natural, petróleo, carvão mineral), se mostram benéficas em relação ao equilíbrio do ciclo de produção energética e à diminuição da poluição ambiental (GE *et al.*, 2018). No entanto, conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no ano de 2020, a principal fonte de energia elétrica do Brasil ainda é proveniente de hidrelétricas (60,6%), como também de combustíveis fósseis, sendo os mais utilizados o gás natural (8,1%), petróleo (5,1%) e carvão mineral (2%).

O valor comercial de investimento em fontes renováveis, como a energia solar, tem se mostrado em recessão, principalmente pela ampliação da sua utilização e do avanço tecnológico nessa área, o que tem favorecido o seu desenvolvimento. No decorrer das próximas décadas, as fontes limpas tendem a representar grande parcela da matriz energética brasileira (SCHAEFFER *et al.*, 2016).

A energia solar é notavelmente a fonte energética de maior abundância, nesse sentido, a aplicação dessa energia pode representar estimada contribuição na evolução sustentável da sociedade. Nesse contexto, ao levar em consideração o problema de escassez de água, que é um grande desafio enfrentado por muitos indivíduos do semiárido brasileiro (AL, BA, CE, PB, PE, PI, RN, SE, MA e MG), a dessalinização solar pode ser uma alternativa para minimizar esse problema (SANTOS *et al.*, 2018).

Os sistemas de dessalinização, em sua grande maioria, requerem uma entrada térmica ou elétrica que pode ser fornecida pela energia solar. Além disso, o processo de dessalinização é amplamente adotado na América do Norte, Ásia, Europa, África, Austrália e no Oriente Médio (SHARON; REDDY, 2015).

As unidades de dessalinização baseadas em uso de energia renovável são bastante indicadas para regiões áridas, semiáridas e também regiões remotas, onde geralmente fornecimento de energia elétrica é mais difícil (CHAIBI, 2000). Tendo em vista que a região nordeste, no Brasil, é a que apresenta os maiores índices de irradiação solar direta, conforme ilustrado pela Figura 1, e que nela é comum períodos prolongados de escassez de água, essa tecnologia pode ser empregada para a dessalinização de água nessas regiões.



Figura 1 - Irradiação solar direta normal anual com destaque para regiões com maior potencial de aproveitamento da energia solar concentrada

Fonte: PEREIRA et al. (2017).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho apresenta uma potencial alternativa de aproveitamento de energia solar no Brasil, a partir da utilização da tecnologia de concentradores solares parabólicos na aplicação de dessalinização solar. O objetivo desta pesquisa foi a análise de um concentrador solar cilíndrico parabólico como fonte de energia para um dessalinizador solar térmico, analisando sua capacidade energética e estimativa de produção de água dessalinizada.

1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, têm-se:

- a) Desenvolver o balanço de energia do concentrador solar parabólico;
- b) Calcular o potencial energético do concentrador;

c) Avaliar a taxa estimada para produção de água dessalinizada diária;

d) Analisar a instrumentação e a construção do concentrador solar e do sistema de rastreamento solar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1912, o engenheiro Frank Shuman, em colaboração com o físico Charles Vernon Boys, construíram a maior usina de bombeamento de água do mundo em Maadi, no Egito. O sistema possuía longos concentradores cilíndricos parabólicos, cerca de 60 metros de comprimento em uma área total de 1200 m². Foi desenvolvido o equivalente a 37-45 kW, continuamente, por um período de 5 horas (KREITH; KREIDER, 1978).

No ano de 1975, Duff, Lameiro e Löf, propuseram um modelo para avaliar a viabilidade econômica de vários tipos de concentradores solares com absorvedores de foco linear. A pesquisa buscava encontrar um custo mínimo para uma usina solar com concentradores para a geração de energia.

Em sua pesquisa, Mota e Andrade (1986) desenvolveram um dessalinizador solar para constatar a influência da destilação solar sobre micro-organismos presentes na água, e possíveis mudanças nas características físico-químicas da água. Foi possível concluir que no processo de dessalinização solar os microrganismos são eliminados e há a ocorrência de alterações como: redução do teor de cloretores, da alcalinidade, da condutividade elétrica e da turbidez da água.

Os pesquisadores Moustafa *et al.* (1985) acompanharam um sistema de dessalinização de múltiplos estágios, sendo o sistema alimentado por energia produzida a partir de 220 m² de uma usina solar com concentradores solares parabólicos. O dessalinizador possuía 12 estágios e um tanque de armazenamento térmico de 7 m³. A capacidade de produção de água dessalinizada conseguia chegar a 10 m³ por dia.

No seu trabalho, García-Rodríguez e Gómez-Camacho (1999) pesquisaram experimentalmente um sistema de dessalinização de múltiplos efeitos acoplado a um coletor solar parabólico, e concluíram que a produção anual de energia térmica é cerca de 23% maior para um sistema com eixo de rotação norte-sul do que leste-oeste. A média anual máxima do tempo de operação diária é de 12 h por dia em áreas costeiras no sul da Espanha.

Durante sua pesquisa, Schwarzer *et al.* (2000) desenvolveram um trabalho que apresentava equações de balanço de energia e massa, simulação da taxa de produção de água dessalinizada e ensaios experimentais de um dessalinizador térmico com sistema de recuperação de calor. O sistema era composto por: um coletor solar e uma torre de dessalinização; sendo possível que esse sistema fosse operado por outras fontes energéticas.

Em seu trabalho, Scrivani, Asmar e Bardi (2007) mostraram que usinas solares com concentradores solares podem ser utilizadas para a produção de água dessalinizada, na

remediação ambiental, no tratamento de resíduos e também no processamento de chorume em aterros sanitários de regiões onde os sistemas convencionais são caros e inviáveis.

Os cientistas Abdel-Rehim e Lasheen (2007) conduziram uma pesquisa com análise téorica e validação experimental de um sistema de dessalinização solar acoplado a um concentrador solar parabólico, as temperaturas do sistema tenderam a aumentar em relação aos modelos convencionais. No projeto com o concentrador, a produtividade de água dessalinizada aumentou em média 18%.

No período da sua pesquisa, Alarcón-Padilla *et al.* (2008) desenvolveram um trabalho experimental em um sistema de dessalinização de múltiplos efeitos de água do mar em Almería (Espanha). O sistema além de utilizar concentradores solares parabólicos em uma área de 500 m² com armazenamento térmico de 24 m³, também era alimentado por uma bomba de calor de absorção de duplo efeito com LiBr-H₂O. A caldeira a gás foi utilizada para garantir que o sistema solar térmico funcionasse durante 24 horas por dia. A capacidade de produção de água dessalinizada dessa usina era próxima de 67 m³ por dia

Em suas análises, os pesquisadores Sintali *et al.* (2014) desenvolveram um trabalho direcionado à análise energética de um concentrador solar parabólico. Eles calcularam a sua eficiência térmica, levando em consideração os ganhos e as perdas energéticas entre os componentes do concentrador provocados por fenômenos de transferência de calor.

A pesquisa desenvolvida por Al-Nimr e Dahdolan (2015) apresentou um novo e avançado arranjo tubular acoplado a um concentrador parabólico e tanque de armazenamento com aletas. O concentrador aumentou a concentração de irradiação solar sobre o tanque tubular e aletado. Eles verificaram que com o aumento da temperatura a eficiência e produtividade do sistema também aumentou, sendo observado um ganho de até 33,8% na eficiência térmica.

O trabalho realizado por Stuber *et al.* (2015) desenvolveu um estudo de uma usina solar que era aplicada na dessalinização de água do mar que seria utilizada para agricultura em Firebaugh (EUA). O sistema de dessalinização era de múltiplos efeitos, integrado a um sistema térmico solar de concentradores parabólicos em uma área de 656 m². A capacidade de produção de água dessalinizada dessa usina era de 6,74 m³ por dia.

A análise elaborada por Palenzuela *et al.* (2015) proporcionou uma pesquisa sobre a influência da integração de usinas de energia solar com concentradores solares no processo de dessalinização de água. Eles concluíram que pode ser uma opção sustentável em comparação com usinas que são independentes e não utilizam a energia solar, também foi possível mostrar que essa integração é mais adequada em processos de média ou larga escala, sendo a técnica de múltiplos efeitos uma das mais promissoras.

Em seus estudos, os pesquisadores Arunkumar *et al.* (2016) analisaram a influência de um concentrador parabólico em um sistema de dessalinização por simples efeito. Em uma faixa de radiação solar entre 652 a 1159 W/m², sendo 10 ml/min a vazão do fluido de trabalho (água) e uma variação de temperatura entre 72°C e 95°C, o sistema aumentou a produção de água dessalinizada.

A pesquisa realizada por Hassan *et al.* (2019) analisou a performance de um concentrador parabólico adaptado a um sistema de dessalinização por simples efeito. Foram analisados dois períodos durante o ano, no inverno e no verão da cidade Sohag (Egito). No inverno, o rendimento de produção de água dessalinizada aumentou aproximadamente 13,7%. No verão, o aumento foi de aproximadamente 14,1%.

Durante seu trabalho, os cientistas Abdessemed *et al.* (2019) verificaram a influência de um concentrador parabólico associado a um sistema de dessalinização por múltiplos efeitos na cidade de Batna (Argélia). Foram testadas bandejas do tipo V e L, as de forma V foram mais eficientes na produção de água dessalinizada. No primeiro estágio, conseguiram uma produção de 310 ml/dia; no segundo, 235 ml/dia; no terceiro, 145 ml/dia e no quarto, 110 ml/dia.

Em sua pesquisa, os pesquisadores Madiouli *et al.* (2020) acompanharam experimentalmente, em Abha (Arábia Saudita), a utilização de um conjunto de coletores, um de placa plano e outro do tipo concentrador parabólico, associado ao processo de dessalinização térmica convencional. Os resultados revelaram que o conjunto apresentou uma taxa de produção de água dessalinizada mais alta, aumentou cerca de 172% no inverno e 203% no verão.

Na pesquisa, realizada pelos cientistas Colmenar-Santos *et al.* (2020), eles verificaram a aplicação de energia solar, através de concentradores solares parabólicos, associados à energia geotérmica em usinas de dessalinização em Almería (Espanha). Apresentaram que além de proporcionar o aumento na produção de água dessalinizada, também é possível reduzir a emissão CO_2 a uma taxa próxima de 510.387.920 kg/ano.

3FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Dessalinizadores

O processo de dessalinização é conhecido como a separação entre a água e as moléculas de sais existentes, sendo possível a conversão em água potável a partir de uma água salobra. Os sistemas de dessalinização podem ser classificados de acordo com a fonte energética, como: térmica, mecânica, elétrica e química. As outras classificações dependem do processo de dessalinização; evaporação-condensação, filtração e técnica de cristalização (ALKAISI *et al.*, 2017).

A Figura 2 ilustra as principais técnicas de dessalinização.





Fonte: Adaptado de ALKAISI et al. (2017).

A dessalinização a partir de processos térmicos utiliza energia na forma de calor para realizar a separação dos sais da água. Esse calor pode ser fornecido de diversas fontes, como: resistência elétrica, combustíveis fósseis, reações químicas exotérmicas e energia solar. Sendo possível também, que essas fontes sejam relacionadas e formem sistemas híbridos de fornecimento de energia. Como apresentado na ilustração da Figura 2, os principais processos térmicos de dessalinização são: Dessalinização por Simples Efeito, Dessalinização por Múltiplos Efeitos, Dessalinização por Múltiplos Estágios Flash e Dessalinização por Umidificação-Desumidificação (DUTRA, 2016).

3.1.1 Dessalinização por Simples Efeito

Na dessalinização por simples efeito, a radiação solar incide através de uma cobertura e é absorvida, aumentando a temperatura do sistema. O calor é então conduzido até a água salobra e somente a água sem sais é evaporada. O vapor de água flui para a parte de cima e entra em contato com uma cobertura que permanece em uma temperatura mais baixa, portanto, o vapor é condensado na superfície interna da cobertura e essa água pura condensada é coletada por uma calha de destilação. É comum a superfície interna ser pintada de preto para aumentar a absorção de radiação solar, e isolada com madeira ou lã de vidro para reduzir a perda de transferência de calor para a atmosfera (NAYI; MODI, 2018).

A estrutura convencional desse sistema é mostrada na Figura 3.



Figura 3 - Esquema convencional de um dessalinizador por simples efeito

Fonte: Adaptado de NAYI; MODI (2018).

Geralmente, a tampa com o vidro de condensação é inclinada em um ângulo igual à latitude local, de modo que a radiação solar máxima possa ser absorvida pelo dessalinizador. No entanto, embora esse sistema seja considerado simples na construção e operação, além de possuir baixo custo e baixa manutenção, ele apresentada baixa produtividade (RAHBAR; ESFAHANI, 2012).

3.1.2 Dessalinização por Múltiplos Efeitos

Os sistemas de dessalinização por múltiplos efeitos consistem em basicamente de várias partições ou estágios paralelos que estão em contato com a água salobra. O calor fornecido ao sistema é absorvido na primeira partição, onde circula um fluido quente, o que causa a evaporação da água salobra. O vapor de água formado difunde-se através da camada de ar úmida entre as partições e devido à perda de energia condensa-se no outro estágio. O processo de evaporação e condensação é repetido em todos os estágios, aumentando a produção de água dessalinizada (TANAKA *et al.*, 2005).

Na Figura 4 é ilustrado um dessalinizador de múltiplos efeitos.



Figura 4 - Dessalinizador de múltiplos efeitos

Fonte: Adaptado de TANAKA et al. (2005).

Os dessalinizadores de múltiplos efeitos, de maneira geral, costumam ocupar grandes áreas, além de serem considerados de tecnologia mais complexa no que se refere à manutenção. Quando comparados aos sistema de dessalinização por simples efeito, os dessalinizadores de múltiplos efeitos apresenta maior produtividade (RAJASEENIVASAN *et al.*, 2013).

3.1.3 Dessalinização por Múltiplos Estágios Flash

No processo de múltiplos estágios *flash*, a água salobra é aquecida até atingir uma temperatura abaixo da temperatura de ebulição. Após isso, ela passa por uma série de estágios, onde a pressão ambiente torna possível seu aquecimento mais rápido e a sua transformação em vapor. A parcela dessa água que é convertida em vapor está relacionada diretamente com a pressão interna do estágio, pois a ebulição é mantida até que a água seja resfriada e o processo de vaporização seja interrompido. Então, esse vapor ao ser condensado nos tubos de trocadores de calor que passa por cada estágio é convertido em água dessalinizada (SHATAT; RIFFAT, 2014).

Na Figura 5 é esquematizado um sistema convencional de dessalinização por múltiplos estágios *flash*.



Figura 5 - Dessalinizador de múltiplos estágios flash

Fonte: Adaptado de SHATAT; RIFFAT (2014).

Esse tipo de dessalinizador costuma ser considerado de alta produção, à medida que o número de estágios e a temperatura do sistema são aumentados. No entanto, essa elevação pode causar problemas de escamação em que os sais presentes na água precipitam nas superfícies dos tubos e ocasionam problemas térmicos e mecânicos (BUROS, 2000).

3.1.4 Dessalinização por Umidificação-Desumidificação

Nos dessalinizadores por umidificação-desumidificação são utilizados dois trocadores de calor para produzir água dessalinizada. Esses trocadores são o umidificador e o desumidificador, neles há transferência simultânea de calor e massa devido altas temperaturas e variações de concentração entre água e ar.

No umidificador, que funciona como um evaporador, a água salobra circula no lado do sistema que fornece altas temperaturas, aumentando o teor de vapor do ar. Então, esse ar quente e úmido é transferido ao desumidificador (condensador) no qual a água dessalinizada é produzida a partir do resfriamento desse ar. A água dessalinizada produzida pelo processo de umidificação-desumidificação é coletada na parte inferior do desumidificador (DEHGHANI *et al.*, 2018). Na Figura 6 é apresentado um dessalinizador por umidificação-desumidificação.



Figura 6 - Esquema de um dessalinizador por umidificação-desumidificação

Fonte: Adaptado de DEHGHANI et al. (2018).

Os dessalinizadores de umidificação-desumidificação são considerados competitivos em relação aos demais processos de dessalinização térmica quando sua aplicação é em pequena escala. Eles costumam operar com maior confiabilidade quando são auxiliados por uma bomba de calor. Seus componentes, são acessíveis no mercado e a manutenção do sistema é classificada como simples. A produtividade desse sistema é considerada baixa (NARAYAN *et al.*, 2010).

3.2 Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico

Os concentradores solares cilíndricos parabólicos são coletores de radiação solar que seu funcionamento consiste basicamente em aquecer um fluido de trabalho, sendo mais comumente utilizado: água, óleos minerais ou sintéticos, ar. Esse fluido é escoado no interior de um tubo montado no foco da calha parabólica do concentrador. O aquecimento é consequência da concentração dos raios solares na superfície absorvedora do tubo, onde ocorre a transferência de energia para o fluido de trabalho. Esses concentradores possuem inúmeras aplicações da energia solar, que estão desde a um simples aquecimento de água doméstica para uso pessoal como a uma ampla cadeia de geração de energia para processos industriais (KALOGIROU, 2014).

A Figura 7 apresenta uma ilustração esquemática do funcionamento de um concentrador solar cilíndrico parabólico.



Figura 7 – Esquema de um concentrador solar cilíndrico parabólico

Fonte: Adaptado de OLIA et al. (2019).

Nos concentradores parabólicos, existem alguns parâmetros geométricos que precisam ser calculados para que o feixe de raios solares que incidem na superfície refletora sejam redirecionados eficazmente a uma linha focal, onde está localizado o tubo absorvedor.

Na Figura 8, é apresentada uma seção transversal desse tipo de concentrador com seus principais parâmetros, em seguida eles são apresentados juntamente com relações de conceitos de geometria e trigonometria conforme proposto por Duffie e Beckman (2013).





Fonte: Adaptado de DUFFIE; BECKMAN (2013).

No ponto F está localizado o ponto focal da parábola e φ_r representa o ângulo de abertura do concentrador. Também é mostrado que a incidência de raios solares constitui um feixe de formato cônico com abertura angular de 0,534°, sendo esse ângulo utilizado para calcular o diâmetro mínimo do tubo absorvedor, de tal forma que a radiação solar incidente sobre a superfície refletora seja direcionada efetivamente para o tubo.

O parâmetro *r* representa o raio de abertura do concentrador, ele corresponde à distância entre o ponto focal F e outro ponto localizado na superfície do concentrador, sendo que o maior valor de *r* ocorre quando ele é relacionado ao ângulo de abertura φ_r , passando a ser representado por *r_r*.

O maior raio de abertura r_r pode ser calculado pela expressão:

$$r_{\rm r} = \frac{a}{2{\rm sen}\varphi_{\rm r}} \tag{1}$$

onde **a** representa a largura do concentrador e φ_r o ângulo de abertura.

O diâmetro mínimo para interceptar toda a imagem do tubo absorvedor pode ser calculado conforme a relação entre o raio r_r e o formato cônico formado pela radiação solar:

$$D = 2 \cdot r_r \cdot sen(0,267)$$
 (2)

O comprimento f é a distância do ponto focal F ao ponto A localizado no centro da calha parabólica, podendo ser determinado por:

$$f = \frac{r_r \cdot (1 + \cos\varphi_r)}{2}$$
(3)

A distância entre a superfície do concentrador localizado no ponto A e o ponto focal F é determinado pela equação:

$$\mathbf{x} = \frac{\mathbf{y}^2}{4\mathbf{f}} \tag{4}$$

A razão de concentração, que indica a proporção de concentração da energia solar incidente sobre o coletor, é calculada pela razão entre a área de abertura e a área do absorvedor:

$$c = \frac{a}{\pi D}$$
(5)

O tamanho teórico da imagem no plano focal do concentrador parabólico é representado por:

$$w = \frac{a \cdot sen(0,267)}{sen(0,267)cos(\varphi_r + 0,267)}$$
(6)

3.3 Rastreamento da Radiação Solar

Nos coletores cilíndricos parabólicos é comum que um mecanismo de rastreamento solar seja incorporado em suas estruturas. O principal objetivo desse mecanismo é que a calha refletora, em forma parabólica, permaneça direcionada para o sol, de tal forma que procure o melhor ângulo de exposição à luz solar e então maximize a concentração dos raios solares, uma vez que o sol se move aparentemente em relação à terra ao longo do dia (RANA, 2013).

A aplicação de um sistema de rastreamento solar afeta significantemente o aumento da eficiência da concentração dos raios solares no tubo absorvedor. Ele proporciona o rastreio do sol ainda que dias nublados, sendo capaz de retornar a sua posição inicial ao fim do dia ou período noturno. Também pode ser aplicado em situações com ventos fortes e em ajustes nos mecanismos de escoamento do fluido (BAZAK, 2014).

A Figura 9 mostra a ilustração de um sistema de rastreamento solar sentido lesteoeste.



Fonte: Adaptado de CRESESB (2016).

3.4 Transferência de Calor e Massa

3.4.1 Radiação

A radiação térmica é definida como a energia emitida por um corpo que se encontra em uma faixa de temperatura diferente de zero kelvin, mesmo que ainda exista a presença de vácuo. Portanto, não sendo necessária a existência de contato físico entre corpos para que ocorra a transmissão de energia. Essa energia é transferida por meio de ondas eletromagnéticas ou fótons. A emissão de radiação térmica está relacionada com a energia emitida em razão de movimentos ou transições dos elétrons que compõem o corpo. Podendo, então, ser associada às condições térmicas no interior da matéria.

Ao relacionar a Lei de Stefan-Boltzmann, a expressão para a transferência de calor por radiação é:

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma. A. \epsilon. (T_S^4 - T_{viz}^4)$$
(7)

nessa equação, σ é a constante de Stefan-Boltzmann com valor igual a 5,67 . 10⁻⁸ W/(m² K⁴), *A* a área total da superfície, ε é uma propriedade radiante da superfície conhecida por emissividade no corpo da superfície, T_s a temperatura da superfície e T_{viz} a temperatura da vizinhança.

A emissividade é entendida como a representação da razão entre a radiação emitida pela superfície de um corpo em uma temperatura e a radiação emitida pela superfície de um corpo considerado perfeito emissor e absorvedor de radiação, conhecido como corpo negro. A radiação, ao atingir a superfície de um material, parte dela poderá ser absorvida, outra parte refletida e a parcela final pode ser transmitida. A parte da radiação absorvida é denominada absortividade α , a refletida é a refletividade ρ e a fração transmitida é nomeada de transmissividade τ (INCROPERA *et al.*, 2008; ÇENGEL; GHAJAR, 2015).

A partir da primeira lei da termodinâmica é possível relacionar essas variáveis da seguinte forma:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \tag{8}$$

sendo que os valores de α , ρ e τ variam entre 0 e 1, uma vez que se tratam de parcelas da radiação incidente.

3.4.2 Convecção

A transferência de calor por convecção é definida pelo transporte de energia na forma de calor resultante de um processo combinado da condução de calor através de um fluido associado com a presença de movimento das suas partículas. Ela costuma ser associada em sua grande maioria com um importante e complexo mecanismo de transferência de calor entre um corpo sólido, líquido ou gasoso.

A convecção pode ser caracterizada como convecção livre (natural) ou convecção forçada. Sendo classificada como livre quando o movimento do fluido é provocado por mecanismos naturais ocasionados pelas diferenças de massas específicas, o que proporciona o efeito termossifão. Por outro lado, a convecção forçada é quando o fluido ao sofrer influência de meios externos é forçado a escoar sobre a superfície ou no interior dela (MORAN *et al.*, 2005; ÇENGEL; GHAJAR, 2015).

A taxa de transferência de calor por convecção está diretamente proporcional à variação de temperatura, representada pela lei de Newton do resfriamento:

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{\infty}) \tag{9}$$

em que *h* representa a coeficiente de transferência de calor por convecção, A_s a área de transferência de calor, T_s a temperatura da superfície e T_{∞} a temperatura do fluido suficientemente longe da superfície para que não sofra influência da superfície.

3.4.3 Condução

A transferência de calor por condução é um processo em que a energia térmica é transferida de uma região de maior temperatura para outra de temperatura mais baixa, seja em um meio sólido, líquido ou gasoso, como também entre meios diferentes em contato físico direto. Quanto maior a variação de temperatura, maior a taxa de transferência de calor (KREITH; BOHN, 2003).

Segundo a lei da condução de calor de Fourier, proposta por Jean-Baptiste Joseph Fourier em 1822, a taxa de condução de calor é proporcional à variação de temperatura no meio e à área na direção da transferência de energia térmica. A equação que representa essa relação é expressa como:

$$\dot{Q}_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$
(10)

onde k é a condutividade térmica do material, A a área da seção onde o calor flui por condução medida de maneira perpendicular à direção do fluxo e $\frac{dT}{dx}$ o gradiente de temperatura. A razão do sinal negativo deve-se à direção do aumento da distância x ser a direção do fluxo de calor positivo, ou seja, o calor flui de um ponto com temperatura mais alta para outro de temperatura mais baixa.

3.4.4 Evaporação

O processo de mudança de fase evaporação é caracterizado pela passagem da fase líquida para a fase vapor de um fluido devido a uma variação entre a pressão da camada de saturação e a pressão do fluido na corrente livre. Nesse processo, as moléculas do líquido sofrem colisões e a energia interna é aumentada de tal forma que seja possível superar a energia das ligações na superfície. Em situações de regime permanente, o calor latente cedido pelo líquido na evaporação é compensado pela energia conduzida para o líquido pela superfície vizinha (ALVES, 2009).

A taxa de transferência de calor por evaporação pode ser expressa pela equação:

$$\dot{Q}_{ev} = h_{ev} \cdot A \cdot \Delta T$$
 (11)

sendo que h_{ev} representa o coeficiente de transferência de calor por evaporação, A a área onde ocorre a transferência de calor e ΔT a variação de temperatura provocada pela diferença de pressão entre a saturação do fluido na superfície e a pressão do fluido na corrente livre.

3.4.5 Condensação

A condensação pode ser definida como a transformação de fase em que um fluido na fase de vapor retorna à sua fase líquida. Ela ocorre quando a temperatura de um vapor é reduzida a valores menores do que sua temperatura de saturação. O calor latente do vapor é liberado, a energia é transferida para a superfície, formando então o condensado (INCROPERA *et al.*, 2008). A taxa de transferência de calor para a superfície pode ser obtida pela expressão:

$$\dot{Q}_c = h_c \cdot A \cdot (T_{sat} - T_s)$$
⁽¹²⁾

em que h_c representa o coeficiente de transferência de calor por condensação, A a área onde ocorre a transferência de calor, T_{sat} a temperatura de saturação e T_s a temperatura da superfície.

A taxa de condensação pode ser determinada pela equação:

$$\dot{m}_{c} = \frac{h_{c} \cdot A \cdot (T_{sat} - T_{s})}{h_{fg}}$$
(13)

onde h_{fg} representa o valor da quantidade de calor latente de vaporização.

3.5 Balanço de Energia no Coletor Solar

A análise térmica do concentrador solar parabólico utiliza um balanço de energia que inclui todas as equações e correlações necessárias para relacionar os termos do balanço; que depende do tipo de coletor, parâmetros do tubo absorvedor, propriedades ópticas da superfície refletora e também condições atmosféricas.

A energia, proveniente das propriedades ópticas da superfície refletora, está diretamente relacionada com as possíveis imperfeições na superfície refletora da calha parabólica, erros de rastreamento, incidência de nuvens e também de limpeza nas superfícies do sistema. No balanço, a energia solar efetiva (energia solar menos as perdas ópticas) é absorvida pelo absorvedor. Essa energia é conduzida pelo absorvedor e transferida ao fluido pelos fenômenos de transferência de calor: convecção, radiação, condução e convecção; a energia remanescente é transmitida de volta ao ambiente por radiação e convecção e também parte dela é perdida através da condução entre o suporte de fixação do coletor cilíndrico parabólico (FORRISTALL, 2003).

Na Figura 10 é mostrado o balanço de energia em uma seção transversal do tubo e também o modelo de resistência térmica.



Figura 10 - Balanço de energia e modelo de resistência térmica

Fonte: Adaptado de FORRISTALL (2003).

Com base na Figura 10, é possível equacionar a conservação de energia do sistema. Os termos desse equacionamento são definidos no Quadro 1.

$$\dot{q}_{1conv} = \dot{q}_{1cond} \tag{14}$$

$$\dot{q}_{Sol} = \dot{q}_{2conv} + \dot{q}_{rad} + \dot{q}_{1cond} + \dot{q}_{2cond,est}$$
(15)

$$\dot{q}_{perda} = \dot{q}_{2conv} + \dot{q}_{rad} + \dot{q}_{2cond,est}$$
(16)

Eluva da calar	Fenômeno de	Região de transferência de calor		
(W/m)	transferência de calor	Desde	Para	
ġ₁ _{conv}	Convecção	superfície interna do tubo absorvedor	fluido de trabalho	
॑q _{1cond}	Condução	superfície externa do tubo absorvedor	superfície interna do tubo absorvedor	
	Convecção	superfície externa do tubo absorvedor	ambiente	
q _{rad}	Radiação	superfície externa do tubo absorvedor	ambiente	
॑q _{2cond,est}	Condução	superfície externa do tubo absorvedor	suporte de fixação do coletor	
q _{Sol}	Irradiação solar absorvida	incidência de irradiação solar	superfície externa do tubo absorvedor	
q _{perda}	Radiação e convecção	coletor cilíndrico parabólico	ambiente	

Quadro 1 - Termos do balanço de energia

Fonte: Adaptado de FORRISTALL (2003).

Segundo Çengel e Ghajar (2015), Incropera *et al.* (2008) e Moran *et al.* (2005), é possível relacionar esses fluxos de calor com os parâmetros do coletor em análise, conforme detalhado a seguir.

3.5.1 Convecção entre a superfície interna do tubo absorvedor e o fluido de trabalho

O processo de convecção entre a superfície interna do tubo e o fluido de trabalho pode ser calculada dessa forma:

$$\dot{q}_{1conv} = h_1 . D_{int} . \pi . (T_{int} - T_{med1})$$
 (17)

onde D_{int} é o diâmetro interno do tubo, T_{int} a temperatura da superfície interna do tubo, T_{med1} a temperatura média do fluido de trabalho e h_1 o coeficiente de transferência de calor por convecção do fluido.

O coeficiente de transferência de calor por convecção (h_1) é determinado pela expressão:

$$h_1 = Nu_{Dint} \cdot \frac{k_1}{D_{int}}$$
(18)

em que k_1 é a condutividade térmica do fluido e Nu_{Dint} é o número de Nusselt com base no D_{int} .

O número de Nusselt depende da classificação do regime de escoamento dentro do tubo absorvedor. Em situações que o regime do fluxo é turbulento, ou seja, número de Reynolds maior que 2300, ele pode ser encontrado por:

$$Nu_{Dint} = \frac{f_{int. 8^{-1}. (Re_{Dint} - 1000). Pr_{med1.} (Pr_{med1.} Pr_{int}^{-1})^{0,11}}{1 + 12.7 . (f_{int. 8^{-1}})^{0.5} . (Pr_{med1}^{\frac{2}{3}} - 1)}$$
(19)

sendo Re_{int} o número de Reynolds com base no D_{int} , Pr_{med1} o número de Prandtl com a temperatura média do fluido de trabalho, Pr_{int} o número de Prandtl em relação a temperatura da superfície interna do absorvedor e f_{int} o fator de atrito para a superfície interna do tubo absorvedor.

O fator de atrito f_{int} pode ser determinado com a equação:

$$f_{\rm int} = \frac{1}{[1,82 . \ln({\rm Re}_{\rm Dint}) - 1,64]^2}$$
(20)

Quando o número de Reynolds estiver em uma faixa menor que 2300, Nusselt é considerado constante a um valor de 4,36 para dutos de seção circular.

3.5.2 Condução entre a superfície externa e interna do tubo absorvedor

A transferência de calor por condução entre a superfície externa e interna do tubo pode ser expressa pelo equacionamento:

$$\dot{q}_{1\text{cond}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{med}} \cdot (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})}{\ln \left(\frac{D_{\text{ext}}}{D_{\text{int}}}\right)}$$
(21)

onde D_{ext} é o diâmetro externo do tubo e k_{med} é a condutividade térmica na temperatura média entre a temperatura interna da superfície do tubo (T_{int}) e a temperatura externa da superfície do tubo (T_{ext}) .

3.5.3 Convecção entre a superfície externa do tubo absorvedor e o ambiente

A convecção entre a superfície externa do tubo e o fluido de trabalho pode ser encontrada por:

$$\dot{q}_{2\text{conv}} = h_2 \cdot D_{\text{ext}} \cdot \pi \cdot (T_{\text{ext}} - T_{\text{amb}})$$
(22)

em que T_{amb} é a temperatura ambiente e h_2 é o coeficiente de transferência de calor por convecção do ar.

O coeficiente de transferência de calor por convecção do ar (h_2) é determinado pela expressão:

$$h_2 = Nu_{Dext} \cdot \frac{k_2}{D_{ext}}$$
(23)

onde k_2 é a condutividade térmica do ar na variação de temperatura T_{ext} menos T_{amb} dividido por dois e Nu_{Dext} é o número de Nusselt com base no D_{ext} .

O número de Nusselt em relação ao ar é relacionado se a transferência de calor ocorre por convecção natural ou convecção forçada. Para situações em que ocorra convecção natural, as seguintes correlações devem ser utilizadas:

$$Nu_{Dext} = \{ [0,60 + \frac{0,387.(Ra_{Dext})^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr_2}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{3}{27}}}] \}^2$$
(24)

$$Ra_{Dext} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{ext} - T_{amb}) \cdot D_{ext}^{3}}{(\alpha_{1} \upsilon_{1})}$$
(25)

$$\beta = \frac{1}{T_{\rm f}} \tag{26}$$

$$\Pr_2 = \frac{\upsilon_1}{\alpha_1} \tag{27}$$

em que Ra_{Dext} é o número de Rayleigh com base no D_{ext} , g é a aceleração local da gravidade, α_1 é a difusividade térmica na temperatura do filme da superfície do tubo, β é o coeficiente volumétrico de expansão térmica, Pr_2 é o número de Prandtl em relação a temperatura do filme da superfície do tubo, v_1 é a viscosidade cinemática para o ar na temperatura do filme da superfície do tubo e T_f é a temperatura do filme da superfície do tubo.

Quando ocorre convecção forçada, é utilizado o número de Nusselt é calculado por:

$$Nu_{Dext} = C \cdot Re_{Dext}^{m} \cdot Pr_{amb}^{n} \cdot \sqrt[4]{\frac{Pr_{amb}}{Pr_{ext}}}$$
 (28)

onde Re_{Dext} é o número de Reynolds com base no D_{ext} , Pr_{amb} é o número de Prandtl em relação a temperatura ambiente, Pr_{ext} é o número de Prandtl em relação a temperatura externa na superfície do tubo e os coeficientes C, m e n são fatores de correção. É utilizado n igual a 0,37 quando o número de Prandtl for menor ou igual a 10; quando for maior que 10, n é igual

a 0,36. Os valores de C e m podem ser utilizados conforme o Quadro 2.

Quadro 2 - F	atores de	correção
--------------	-----------	----------

Quadro 2 Tatores	de come	çuo
Re _{Dext}	С	m
1 a 40	0,75	0,4
40 a 1000	0,51	0,5
1000 a 200000	0,26	0,6
200000 a 1000000	0,076	0,7

Fonte: Adaptado de INCROPERA et al. (2008).

3.5.4 Radiação entre a superfície externa do tubo absorvedor e o ambiente

A transferência de calor por radiação entre a superfície externa do tubo e o ambiente pode ser determina pela expressão:

$$\dot{q}_{rad} = \sigma . D_{ext} . \pi . \varepsilon_1 . (T_{ext}^4 - T_a^4)$$
(29)

sendo σ a constante de Stefan-Boltzmann, ε_1 a emissividade da superfície externa do tubo e T_a a temperatura efetiva do ambiente.

3.5.5 Condução entre a superfície externa do tubo absorvedor e o suporte de fixação do coletor cilíndrico parabólico

A condução de calor entre a superfície externa do tubo e o suporte de fixação do coletor pode ser estimada pela equação:

$$\dot{q}_{2\text{cond,est}} = \frac{\sqrt{h_3 \cdot P \cdot k_3 \cdot A_3} \cdot (T_3 - T_{amb})}{L_t}$$
(30)

onde *P* é o perímetro da seção transversal do suporte de fixação, k_3 é o coeficiente de condutividade térmica do suporte de fixação, A_3 é a área de seção transversal do suporte de fixação, T_3 é a temperatura na superfície do suporte de fixação, L_t é o comprimento do tubo absorvedor e h_3 é o coeficiente de transferência de calor por convecção do ar.

3.5.6 Irradiação solar no tubo absorvedor

A energia solar que é absorvida pelo tubo absorvedor pode ser determinada pelo equacionamento:

$$\dot{q}_{Sol} = \dot{q}_S \cdot \eta_a \cdot \alpha_a \tag{31}$$

em que \dot{q}_S representa a quantidade de radiação solar por comprimento do tubo absorvedor, α_a a absortividade do tubo absorvedor e η_a a eficiência óptica do tubo absorvedor.

A eficiência óptica do tubo absorvedor está relacionada com algumas estimativas de possíveis perdas, sendo estimada pela expressão:

$$\eta_a = \varepsilon_a \cdot \varepsilon_b \cdot \varepsilon_c \cdot \varepsilon_d \cdot \varepsilon_e \cdot \varepsilon_f \cdot \rho_1 \cdot K$$
(32)

sendo ε_a a estimativa de eficiência óptica considerando a presença de nuvens; ε_b possível erro no rastreamento; ε_c erro de alinhamento do coletor solar; ε_d presença de pequenas partículas na superfície refletora; ε_e presença de pequenas partículas na superfície do tubo absorvedor; ε_f possíveis perdas não identificadas; *K* modificação do ângulo de incidência da radiação e ρ_1 a refletância da superfície refletora. Esses valores podem ser considerados conforme estimado por Price (2001) no Quadro 3.

Termo influenciador na eficiência óptica	Estimativa
Eficiência óptica considerando a presença de nuvens (ε_a)	0,974
Possível erro no rastreamento (ε_{b})	0,994
Erro de alinhamento do coletor solar (ε_c)	0,980
Refletância da superfície refletora (ρ_1)	0,935
Presença de pequenas partículas na superfície refletora (ε_d)	refletividade/ ρ_1
Presença de pequenas partículas na superfície do tubo absorvedor (ε_e)	$(\epsilon_{\rm d} + 1)/2$
Possíveis perdas não identificadas (ε _f)	0,960

Quadro 3 - Estimativas de eficiência na análise óptica

Fonte: Adaptado de PRICE (2001).

3.5.7 Perda de fluxo de calor

A Equação 16, que equaciona no balanço de energia o termo \dot{q}_{perda} , representa o fluxo de calor que é perdido do sistema solar térmico. Essa perda leva em consideração os fluxos que são perdidos pelos fenômenos de transferência de calor: convecção entre a

superfície externa do absorvedor e o fluido de trabalho, radiação entre a superfície externa do tubo absorvedor e o ambiente, e condução entre a superfície externa do tubo absorvedor e o suporte de fixação do coletor cilíndrico parabólico.

3.5.8 Eficiência Térmica

A eficiência térmica é o termo utilizado na termodinâmica que procura quantificar uma estimativa do nível de aproveitamento de energia em um sistema que envolve transferência de calor. Em um coletor solar térmico, a eficiência térmica no absorvedor que ocorre a conversão de energia solar em calor, é possível ser calculada pela relação:

$$\eta_{t} = \frac{\dot{Q}_{\acute{u}til}}{I} \tag{33}$$

em que $\dot{Q}_{\dot{u}til}$ representa a taxa de transferência de energia na forma de calor útil e *I* é a taxa de radiação solar que incide sobre a superfície de abertura do concentrador solar parabólico. Esses termos podem ser calculados conforme as equações a seguir.

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = m'. \ C_{\text{med}}. \ (T_{\text{ent}} - T_{\text{sai}})$$
(34)

$$I = G . A_a \tag{35}$$

onde m' representa a vazão mássica do fluido de trabalho, C_p o calor específico do fluido de trabalho, T_{ent} a temperatura de entrada do fluido de trabalho no sistema, T_{sai} a temperatura de saída do fluido de trabalho no sistema, G o valor de irradiação total no sistema e A_a a área de abertura do coletor solar (calculada pelo produto da sua largura do coletor com o seu comprimento).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 O Concentrador Solar Parabólico

O concentrador solar parabólico utilizado na pesquisa foi fabricado com uma estrutura a partir de perfis quadrados e retangulares de aço carbono e foi utilizada uma chapa de aço inox espelhada AISI 430 de 0,8 mm de espessura como superfície refletora. No foco da calha parabólica foi montado um tubo de cobre com diâmetro de 5/8", com uma distância focal de 200 mm. A abertura do concentrador é de 900 mm de largura e 1800 mm de comprimento. A eficiência óptica do concentrador é de aproximadamente 81%. Na Figura 11 é apresentado o concentrador solar parabólico.



Figura 11 - Concentrador solar cilíndrico parabólico

Fonte: Autoria própria (2020).

4.2 O Sistema de Rastreamento Solar

Para rastrear o movimento aparente do sol ao longo do dia, foi desenvolvido um sistema de rastreamento o qual foi fixado à estrutura do concentrador parabólico. O sistema de rastreamento é controlado por um microcontrolador Arduino Mega 2560 R3, dentre suas principais características: 54 pinos de entrada/saída digitais, 16 entradas analógicas, 4 portas seriais de hardware e ser possível a conexão via cabo USB, associado a um módulo de dois sensores de luminosidade NORPS-12 do tipo LDR (*Light Depedent Resistor*).

Conforme o *datasheet* desse módulo, o LDR é uma célula fotocondutiva de sulfeto de cádmio (CdS), a qual tem uma resposta espectral similar à do olho humano. Segundo Dally et al. (1993), o LDR é fabricado a partir de materiais semicondutores,

normalmente CdS ou seleneto de cádmio (CdSe), pois eles apresentam uma excelente resposta fotocondutora. A Figura 12 ilustra a superfície de um LDR.





Fonte: Adaptado de Dally et al. (1993).

O módulo com os sensores LDR tem a função de enviar à placa de controle as informações necessárias ao rastreamento do nível de radiação solar. Esses sensores apresentam uma resistência variável conforme a intensidade luminosa que incide sobre sua superfície. A principal vantagem dos sensores LDR está na geração do sinal na magnitude da tensão de referência do microcontrolador, além do seu baixo custo. Por outro lado, a desvantagem da sua utilização é a sua alta sensibilidade à pequenas variações de luminosidade.

A Figura 13 apresenta o módulo de sensores com os LDR utilizados no sistema de rastreamento solar do concentrador solar parabólico.



Figura 13 - Módulo de sensores de luminosidade

Fonte: Autoria própria (2020).

Os LDR's localizados nos planos inclinados (45º em relação à base) são responsáveis por fornecer a resistência elétrica que determinará em qual sentido o concentrador deverá girar. Os dois sensores de luminosidade, cujas variáveis são

representadas no algoritmo por ldrR e ldrL, determinam o sentido em que a calha parabólica deverá girar. O ldrR está localizado no lado direito do módulo de sensores, já o ldrL é o sensor fixo ao lado esquerdo. Se um LDR está recebendo mais radiação solar do que o outro, isto quer dizer que o concentrador está em posição inadequada em relação à incidência de radiação solar direta, implicando em uma diferença de potencial menor neste LDR. Ao perceber esta diferença, a placa comanda o giro do motor no sentido do LDR de menor tensão elétrica, até que os dois LDR's apresentem a mesma diferença de potencial.

A Figura 14 mostra o fluxograma da rotina do código de programação do microcontrolador no processo de rastreamento.

Figura 14 - Fluxograma referente à lógica de programação



Fonte: Autoria própria (2020).

4.3 Os Sensores e a Instrumentação para Aquisição de Dados

Foram coletados dados de temperatura na parede externa do tubo absorvedor de cobre localizado no foco da calha parabólica, e a temperatura de entrada e saída do fluido de trabalho como também dados de radiação solar. Na coleta de dados de temperatura, foram utilizados termopares do tipo K. Eles possuem faixa de leitura de -270 °C a 1372 °C (erro máximo entre 0,5 e 1 °C) e são formados por dois fios metálicos, Níquel e Crômio, que foram unidos em sua extremidade e fixados no concentrador solar parabólico. No sistema, foram utilizados cinco termopares, o primeiro medindo a temperatura de entrada do fluido de trabalho (água) que alimentava o sistema, outros três foram fixados ao longo do tubo absorvedor e o último na saída do sistema medindo a temperatura final do fluido de trabalho. Já a aquisição dos dados de radiação solar (W/m²), ocorreu a partir de um sensor piranômetro KimoTM – modelo CR 110, esse piranômetro apresenta uma faixa de leitura de 0 a 1500 W/m² (precisão de 5%). Esses sensores, foram adquiridos para a realização deste trabalho, sendo assim todos continham certificados de calibração. A Figura 15 ilustra a localização desses sensores.



Figura 15 - Localização dos termopares e do piranômetro

Fonte: Autoria própria (2020).

O registro e monitoramento dos dados foram feitos através de um registrador de dados da marca Contemp[™], modelo A202. Este *datalogger* é caracterizado por oito entradas universais configuráveis. Sua interface computacional, *MasterLogger A202*, é um sistema supervisório que permitiu monitorar e caracterizar os dados que foram fornecidos pelo piranômetro e pelos termopares em unidade de tensão elétrica.

Esse software (*MasterLogger A202*) apresenta uma interface simples, além de possibilitar a interação com as grandezas medidas, incluindo gráficos e alarmes. Além disso, a interface computacional dispõe da funcionalidade de geração de relatório em PDF, contendo tabelas e gráficos dos dados no modo histórico ou *logger*, análise de dados com informação de valor mínimo, máximo e média de cada canal, como também a personalização de campos e logotipo do relatório. A Figura 16 mostra o *datalogger* A202 utilizado neste trabalho.



Figura 16 - Datalogger modelo A202 (ContempTM)

Fonte: Autoria própria (2020).

4.4 Motor de Passo

Na transmissão de movimento, para mover o concentrador parabólico em sentido que aumentasse a concentração dos raios solares, foi utilizado um motor de passo bipolar (modelo 86BHH1500-424E-37BS). Ele possui como características 4 bobinas (8 fios) para uma tensão de 12 V e um torque de 100 kgf.cm. Os motores de passo também possuem como característica a alta precisão em seus movimentos, sendo aplicado em sistemas onde o controle do ângulo de rotação é muito importante, tal qual o sistema de rastreamento deste trabalho. A Figura 17 apresenta o motor de passo.



Figura 17 - Motor de passo bipolar (86BHH1500-424E-37BS)

Fonte: Autoria própria (2020).

O microcontrolador Arduino não era capaz de controlar diretamente as bobinas do motor por causa da elevada corrente, sendo necessária a utilização de um circuito intermediário com a capacidade de fornecer tensões e correntes adequadas. O circuito intermediário aplicado foi o *driver*. A função do *driver* é ajustar os sinais de controle enviados pela placa de controle para os níveis adequados ao motor de passo. O *driver* utilizado foi o de modelo TB6560, com 6 entradas e uma tensão de entrada de 5 V que pode ser expandida ao modificar o arranjo entre os resistores. A Figura 18 apresenta o circuito intermediário.

Figura 18 - Driver modelo TB6560



Fonte: Autoria própria (2020).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para verificar o desempenho do concentrador parabólico foram coletados dados de radiação solar, temperatura na superfície externa do tubo absorvedor e temperatura do fluido de trabalho (água), no Laboratório de Energias Renováveis (LER) da Universidade Federal do Piauí (Latitude: 5° 03' 25.8" Sul, Longitude: 42° 47' 59.7" Oeste), no mês de novembro do ano de 2017 na cidade de Teresina (Piauí). O funcionamento do concentrador foi analisado sob duas condições. A primeira com a presença de muitas nuvens e a segunda com uma menor incidência de nuvens. A Figura 19 apresenta a distribuição de radiação solar, a temperatura média na superfície do tubo absorvedor representada pelo símbolo TM e a temperatura de entrada (T1) e saída (T5) do fluido em um dia com muitas nuvens.



Figura 19 - Radiação solar e temperatura com muitas nuvens

Fonte: Autoria própria (2020).

É possível constatar, através do gráfico, que apesar da incidências de muitas nuvens os índices de radiação solar teve períodos em que permaneceu próximo de 850 W/m² em média, alcançando-se índices de 990 W/m². Em relação à temperatura do tubo absorvedor, conseguiu atingir temperatura de 98,6°C, nesse ponto a temperatura da água ficou acima de 100°C – deixando sua fase líquida e passando a vapor. Pode-se observar também que nos períodos em que a incidência de nuvens foi maior, a temperatura da água e do tubo diminuíram consideravelmente – como no período entre 12h08min e 12h43min, e também no período entre 15h02min e 15h28min.

A Figura 20 apresenta a distribuição de radiação solar, a temperatura média na superfície do tubo absorvedor e a temperatura de entrada e saída do fluido em condição com incidência de uma quantidade menor de nuvens.



Figura 20 - Radiação solar e temperatura com a presença de nuvens em intervalos menores

Fonte: Autoria própria (2020).

Nesse período os índices de radiação solar teve momentos em que permaneceu próximo de 800 W/m² na média, conseguindo chegar em 900 W/m². Em relação à temperatura do tubo, conseguiu atingir temperatura média de 80°C. Pode-se observar também que nos períodos em que a incidência de nuvens foi por um período maior, a temperatura da água e do tubo diminuíram consideravelmente – como no período entre 12h29min e 12h38min, e também no período entre 13h50min e 13h54min.

Foi possível analisar a eficiência do concentrador solar parabólico nessas duas situações, as Figuras 21 e 22 apresentam o resultado das eficiências ao longo do período.



Figura 21 - Eficiência térmica do concentrador solar com muitas nuvens

Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 22 - Eficiência térmica do concentrador com a presença de nuvens em intervalos menores



Fonte: Autoria própria (2020).

No primeiro período (Figura 21), a eficiência térmica do concentrador apresentou altas variações, como por exemplo o representado no intervalo entre o horário de 15h29min e 15h30min, essas variações se devem principalmente à constante presença de nuvens. Apesar disso o concentrador conseguiu manter sua eficiência térmica média em 21,8%.

No segundo período (Figura 22), a eficiência térmica do concentrador também apresentou variações, no entanto, menores do que na situação anterior, isso por causa da menor incidência de nuvens. O concentrador conseguiu manter a eficiência média em 24,7%.

Considerando uma solução de água com alta salinidade com concentração de 35.000 ppm (partes por milhão), foi possível estimar o potencial energético para o processo dessalinização desse concentrador solar parabólico. Nas Figuras 23 e 24 são apresentadas as taxas estimadas de produção de água dessalinizada.



Figura 23 - Taxa estimada de produção de água dessalinizada sob muitas nuvens

Fonte: Autoria própria (2020).

Na Figura 23, é possível perceber oscilações de taxa produção de água dessalinizada entre valores de 155,14 ml/min (horário de 14h51min) e 0,782 ml/min (horário de 15h32min) permanecendo uma taxa média de produção em 68,67 ml/min. Já na Figura 24, essa taxa varia entre valores de 17,98 ml/min (horário de 12h13min) e 129,35 ml/min (horário

de 16h02min) permanecendo uma taxa média de produção em 82,10 ml/min. Esses valores foram superiores ao encontrados por Abdessemed et al. (2019), que também utilizou a tecnologia concentrador solar parabólico em um sistema de dessalinização solar.





Fonte: Autoria própria (2020).

6 CONCLUSÃO

A partir da pesquisa desenvolvida, foi possível constatar que o concentrador solar parabólico apresentou desempenho satisfatório nos períodos em que a radiação solar mantevese acima de 700 W/m² e também na presença de poucas nuvens sobre o sistema, quando comparada ao trabalho de Abdessemed *et al.* (2019), que também utilizou concentrador solar parabólico como fonte de energia em um sistema de dessalinização.

Em condições como essa apresentada no trabalho, a temperatura do tubo absorvedor apresentou variações máximas acima de 98,6 °C, tornando possível a temperatura do fluido de trabalho atingir valores acima de 100 °C. Diante dessas condições, o concentrador solar possui uma estimativa de fornecer energia para produzir taxas médias de produção de água dessalinizada entre 68,67 ml/min e 82,10 ml/min, sendo capaz de estimar sua capacidade de produção média de 24,63 litros de água dessalinizada por dia.

Sendo assim, foi possível alcançar os objetivos do trabalho, tais como desenvolver o balanço de energia do concentrador solar parabólico, calcular o potencial energético do concentrador, avaliar a taxa estimada para produção de água dessalinizada diária e também analisar a instrumentação e a construção do concentrador solar e do sistema de rastreamento solar.

REFERÊNCIAS

ABDEL-REHIM, Z. S.; LASHEEN, A. *Experimental and theoretical study of a solar desalination system located in Cairo, Egypt.* **Desalination**, v. 217, p. 52-64, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.012. Acesso em: 30 jun. 2019.

ABDESSEMED, A.; BOUGRIOU, C.; GUERRAICHE, D.; ABACHI, R. *Effects of tray shape of a multi-stage solar still coupled to a parabolic concentrating solar collector in Algeria*. **Renewable Energy**, v. 132, p. 1134-1140, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.074. Acesso em: 29 jul. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Matriz de Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: 01 mar. 2020.

ALARCÓN-PADILLA, D.; BLANCO-GÁLVEZ, J.; GARCÍA-RODRÍGUEZZ, L.; GERNJAK, W.; MALATO-RODRÍGUEZ, S. *First experimental results of a new hybrid solar/gas multi-effect distillation system: the AQUASOL project.* **Desalination**, v. 220, p. 619-625, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.05.027. Acesso em: 25 jun. 2019.

ALKAISI, A.; MOSSAD, R.; SHARIFIAN-BARFOROUSH, A. A review of the water desalination systems integrated with renewable energy. **Energy Procedia**, v. 110, p. 268-274, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.138. Acesso em: 28 mai. 2019.

AL-NIMR, M. A.; DAHDOLAN, M. *Modeling of a novel concentrated solar still enhanced with a porous evaporator and an internal condenser*. **Solar Energy**, v. 114, p. 8-16, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.01.021. Acesso em: 15 jun. 2019.

ALVES, R. D. B. **Sistema de captação de energia solar para uma torre de dessalinização térmica com recuperação de calor**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, 2009.

ARUNKUMAR, T.; VELRAJ, R.; DENKENBERGER, D.C; SATHYAMURTHY, R.; KUMAR, K. V.; AHSAN, A. *Productivity enhancements of compound parabolic concentrator tubular solar stills*. **Renewable Energy**, v. 88, p. 391-400, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.051. Acesso em: 12 mai. 2019.

BAZAK, O. D.; SAZAK, B. S. *Effect of Components on a Solar Panel System Efficiency*. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 3, i. 17, 2014.

BUROS, O.K. The ABCs of Desalting. Internacional Desalination Association, 2000.

CHAIBI, M. T. An overview of solar desalination for domestic and agriculture water needs in remote arid areas. **Desalination**, v. 127, p. 119-133, 2000. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00197-6. Acesso em: 17 mai. 2019.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO (CRESESB). **Tutorial de Geração Heliotérmica**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&catid=161#cap_2>. Acesso em: 31 mai. 2019.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. *Heat and Mass Transfer: fundamentals & applications*. New York: McGraw-Hill Education, 2015.

COLMENAR-SANTOS, A.; PALOMO-TORREJÓN, E.; MUR-PÉREZ, F.; ROSALES-ASENSIO, E. *Thermal desalination potential with parabolic trough collectors and geothermal energy in the Spanish southeast*. **Applied Energy**, v. 262, p. 114433, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114433. Acesso em: 02 mar. 2020.

DALLY, J. W.; RILLEY, W. F.; McCONNEL, K. G. *Instrumentation for Engineering Measurements*. John Wiley & Sons, Inc., 1993.

DEHGHANI, S.; DATE, A.; AKBARZADEH, A. *Performance analysis of a heat pump driven humidification-dehumidification desalination system*. **Desalination**, v. 445, p. 95-104, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.033. Acesso em: 01 jun. 2019.

DUFF, W. S.; LAMEIRO, G. F.; LÖF, G. O. G. *Parametric performance and cost models for solar concentrators*. **Solar Energy**, v. 17, p. 47-58, 1975. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0038-092X(75)90016-X. Acesso em: 20 dez. 2017.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

DUTRA, K. H. **Montagem e teste de um novo arranjo do dessalinizador solar térmico de múltiplos estágios com recuperação de calor**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, 2016.

FORRISTALL, R. *Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2003.

GARCÍA-RODRIGUEZ, L.; GÓMEZ-CAMACHO, C. *Preliminary design and cost analysis of a solar distillation system*. **Desalination**, v. 126, p. 109-114, 1999. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00161-7. Acesso em: 28 jun. 2019.

GE, T.S.; WANG, R.Z.; XU, Z.Y.; PAN, Q.W.; DU, S.; CHEN, X.M.; MA, T.; WU, X.N.; SUN, X.L; CHEN, J.F. *Solar heating and cooling: Present and future development.* **Renewable Energy**, v. 126, p. 1126-1140, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.081. Acesso em: 15 fev. 2019.

HASSAN, H.; AHMED, M. S.; FATHY, M. *Experimental work on the effect of saline water medium on the performance of solar still with tracked parabolic trough collector (TPTC).* **Renewable Energy**, v. 135, p. 136-147, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.112. Acesso em: 30 jul. 2019. INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Key World Energy Statistics 2017*. Paris, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1787/key_energ_stat-2017-en. Acesso em: 24 mai. 2019.

KALOGIROU, S. A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Academic Press, 2014.

KREITH, F.; BOHN, M. S. **Princípios de Transferência de Calor**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

KREITH, F.; KREIDER, J. F. *Principles of solar engineering*. Washington: Hemisphere Pub. Corp, 1978.

MADIOULI, J.; LASHIN, A.; SHIGIDI, I.; BADRUDDIN, I. A.; KESSENTINI, A. *Experimental study and evaluation of single slope solar still combined with flat plate collector, parabolic trough and packed bed.* **Solar Energy**, v. 196, p. 358-366, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.027. Acesso em: 02 mar. 2020.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; MUNSON, B. R.; DEWITT, D. P. **Introdução à engenharia de sistemas térmicos**: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

MOTA, S.; ANDRADE, M. A. N. Uso da destilação solar no tratamento de águas contaminadas por microrganismos. Aplicações às pequenas comunidades. **Revista Tecnologia**, v. 7, p. 24-26, 1986. Disponível em: https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/1388/4205. Acesso em: 30 jun. 2019.

MOUSTAFA, S. M. A.; JARRAR, D. I.; EL-MANSY, H. I. *Performance of a self-regulating solar multistage flash desalination system*. **Solar Energy**, v. 35, p. 333-340, 1985. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0038-092X(85)90141-0. Acesso em: 25 jun. 2019.

NARAYAN, G. P.; SHARQAWY, M. H.; SUMMERS, E. K.; LIENHARD, J. H.; ZUBAIR, S. M.; ANTAR, M. A. *The potential of solar-driven humidification–dehumidification desalination for small-scale decentralized water production*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 1187-1201, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.014. Acesso em: 01 jun. 2019.

NAYI, K. H.; MODI, K. V. *Pyramid solar still: A comprehensive review*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 136-148, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.004. Acesso em: 19 mai. 2019.

PALENZUELA, P.; ZARAGOZA, G.; ALARCÓN-PADILLA, D. *Characterisation of the coupling of multi-effect distillation plants to concentrating solar power plants*. **Energy**, v. 82, p. 986-995, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.109. Acesso em: 20 jun. 2019.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf. Acesso em: 27 mai. 2019.

PRICE, H. *Concentrated Solar Power Use in Africa*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2001.

RAHBAR, N.; ESFAHANI, J.A. *Experimental study of a novel portable solar still by utilizing the heatpipe and thermoelectric module*. **Desalination**, v. 284, p. 55-61, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.036. Acesso em: 19 mai. 2019.

RAJASEENIVASAN, T.; MURUGAVEL, K. K.; ELANGO, T.; HANSEN, R. Samuel. *A review of different methods to enhance the productivity of the multi-effect solar still.* **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 17, p. 248-259. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.035. Acesso em: 31 mai. 2019.

RANA, S. A Study on Automatic Dual Axis Solar Tracker System Using 555 Timer. International Journal of Technical Research and Applications, v. 1, i. 4, p. 77-85, 2013.

SANTOS, A. P. S.; ALBUQUERQUE JR., D. M.; BRAGA, R. A. P.; LIMA, R. A.; MEDEIROS, S. S. **O encolhimento das águas**: o que se vê e o que se diz sobre crise hídrica e convivência com o semiárido. Campina Grande: INSA, 2018. Disponível em: <https://portal.insa.gov.br/images/acervolivros/Livro%20Encolimento%20das%20%C3%A1guas_final.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2019.

SCHAEFFER, R. *et al.* **[R]evolução Energética:** Rumo a um Brasil com 100% de energias limpas e renováveis. São Paulo, 2016. Disponível em: https://storage.googleapis.com/planet4-brasil-stateless/2018/07/Relatorio_RevolucaoEnergetica2016_completo.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2019.

SCHWARZER, K.; VIEIRA, M. E.; FARBER, C. *Solar thermal desalination system with heat recovery*. Euromed 2000, Jerbas, Tunisia, 2000.

SCRIVANI, A.; ASMAR, T. EL.; BARDI, U. *Solar through concentration for fresh water production and waste water treatment*. **Desalination**, v. 206, p. 485-493, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.075. Acesso em: 01 jul. 2019.

SHARON, H.; REDDY, K.S. *A review of solar energy driven desalination technologies*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 1080-1118, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.002. Acesso em: 19 mai. 2019.

SHATAT, M.; RIFFAT, S. B. *Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources*. **Internacional Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 9, p. 1-19, 2014. Disponível em: https://academic.oup.com/ijlct/article/9/1/1/663897. Acesso em: 30 mai. 2019.

SINTALI, I. S.; EGBO, G.; DANDAKOUTA, H. Energy Equations for Computation of *Parabolic-Trough Collector Efficiency Using Solar Position Coordinates*. American Journal of Engineering Research (AJER), v. 3, p. 25-33, 2014. Disponível em: http://www.ajer.org/papers/v3(10)/D031025033.pdf. Acesso: 20 jun. 2019.

STUBER, M. D.; SULLIVAN, C.; KIRK, S. A.; FARRAND, J. A.; SCHILLACI, P. V.; FOJTASEK, B. D.; MANDELL, A. H. *Pilot demonstration of concentrated solar-powered desalination of subsurface agricultural drainage water and other brackish groundwater sources.* **Desalination**, v. 355, p. 186-196, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.037. Acesso em: 01 jul. 2019.

OLIA, H.; TORABI, M.; BAHIRAEI, M.; AHMADI, M. H.; GOODARZI, M.; SAFAEI, M. R. *Application of Nanofluids in Thermal Performance Enhancement of Parabolic Trough Solar Collector: State-of-the-Art*. **Applied Sciences**, v. 9, p. 463, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3390/app9030463. Acesso em: 02 jun. 2019.

TANAKA, H.; NAKATAKE, Y.; TANAKA, M. *Indoor experiments of the vertical multiple-effect diffusion-type solar still coupled with a heat-pipe solar collector*. **Desalination**, v. 177, p. 291-302, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.12.012. Acesso em: 30 mai. 2019.