

OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE CALHA PARABÓLICA PARA PASTEURIZAÇÃO DE ÁGUA

Gustavo Krause Vieira Garcia¹, Taciano Amaral Sorrentino².

Resumo: Neste trabalho um conjunto de parâmetros geométricos será definido com base, principalmente, em condições solares otimizar o formato de um concentrador solar cilíndrico parabólico, utilizado como fonte de calor para um pasteurizador de água. Para isso, buscou-se desenvolver um modelo que definisse a eficiência do equipamento em função das variáveis de projeto. Sendo assim, as condições de contorno do problema são estabelecidas de acordo com a região em análise, no caso, Mossoró-RN e o problema solucionado através de um algoritmo otimizador, obtendo assim as variáveis que definem o perfil cilíndrico parabólico e a quantidade de água tratada pelo equipamento projetado.

Palavras-chave: Concentração solar. Calhas parabólicas. Pasteurização.

1. INTRODUÇÃO

No mundo, o acesso a água potável é um problema recorrente. Segundo a ONU, 30% da população mundial é afetada pela escassez ou pela precariedade em que se encontra tal recurso, uma das principais causas de doenças como diarreia e hepatite A. Em se tratando do Brasil, principalmente no Norte e no Nordeste, a água potável ainda é uma realidade um pouco distante em relação às outras regiões do país, sendo comum as pessoas obterem água de fontes sem qualidade atestada, assumindo involuntariamente o risco de se contaminar [1].

Nesse sentido, cabe a sociedade, em especial a comunidade científica, desenvolver soluções factíveis, acessíveis e simples para melhorar esse cenário. Uma das propostas se volta ao desenvolvimento de equipamentos para purificação de água através de uma pasteurização baseada em transferência de calor a partir de energia solar, tecnologia com um grande potencial a ser explorado e que será discutida no trabalho em função do elemento que converte e concentra a radiação solar em energia térmica.

Mais especificamente, busca-se aqui desenvolver um protótipo desse elemento levando em consideração seus custos e facilidade de fabricação atrelados a eficiência e às suas dimensões compactas. Para isso, será proposto um modelo matemático que relaciona fatores físicos e geométricos do elemento, aplicando a ele um algoritmo de otimização para obter um conjunto de variáveis que darão aval a modelagem do coletor solar.

2. DESENVOLVIMENTO

O sol sempre foi objeto do fascínio humano tanto no que relaciona aos aspectos míticos e culturais quanto tecnológicos como o aproveitamento e a conversão do seu potencial energético, áreas que vêm sendo amadurecidas como ciência desde o século XIX. Para se ter noção de tal potencial, o sol irradia na ordem de 10^{14} kW, potência que se captada por 84 minutos seria suficiente para suprir as necessidades energéticas do planeta por 1 ano [2]. O Brasil em específico acumula regiões com recurso solar abrangente, principalmente no Nordeste [3]. Esse recurso pode ser utilizado basicamente de duas formas, seja potencializado ou concentrado por algum tipo de tecnologia (ativo) ou simplesmente “em natura” (passivo). No entanto, os ramos ativos são os que nesse âmbito chamam mais atenção pela sustentabilidade ambiental, eficiência energética e econômica que trazem consigo, principalmente, o fotovoltaico e por concentradores solares (CS) [4].

A conversão fotovoltaica se dá por meio de painéis planos que funcionam a partir de um material semicondutor (geralmente, à base de silício) que ao ser excitado pela luz solar, apresenta uma resposta elétrica contínua que é captada e tratada através de um inversor e transmitida a rede elétrica [5]. De forma geral, esse tipo de tecnologia majoritariamente se volta a geração de energia elétrica.

O aproveitamento através dos concentradores solares também usa painéis para captação dos raios solares, porém podem variar em diversos aspectos como formato, tamanho e material constituinte. No entanto, a principal diferença em relação a fotovoltaica está ligada a forma como se dá a conversão. Nesse tipo de tecnologia, o calor fornecido pelo sol é concentrado ao redor de uma geometria que abriga um fluido para absorção e posterior transporte de energia, que posteriormente pode ser usada primariamente para aquecer algo (inviável para tecnologia fotovoltaica) ou para gerar eletricidade através das plantas heliotérmicas, tecnologia em expansão pelo mundo [5].

2.1. Tipos de concentradores solares

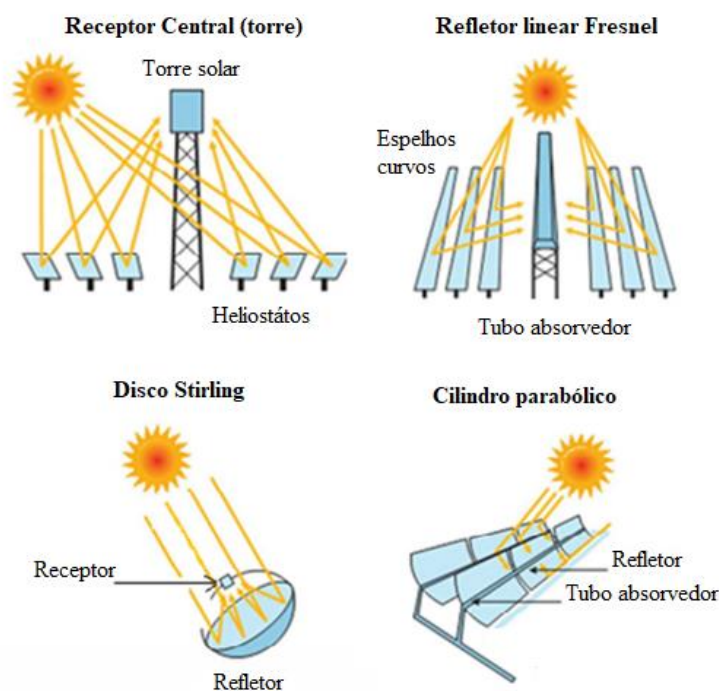
Quanto aos aspectos construtivos, existem quatro tipos de configuração que se encaixam nessa categoria são elas: torres de concentração, Fresnel, discos parabólicos e calhas parabólicas, todos mostrados na Figura 1.

Torres de concentração: baseiam-se na distribuição placas planas espelhadas (heliostatos) ao redor de uma torre central que abriga o fluido a ser aquecido [6].

Fresnel: consiste em várias placas planas espelhadas distribuídas ao redor de um tubo que consiste com uma espécie de linha focal para os raios. Diferentemente da configuração em torre, as placas encontram-se levemente inclinadas à medida que se afastam do tubo focal, mantendo assim o direcionamento dos raios [6].

Discos parabólicos: são basicamente espelhos postos em formato de paraboloide. Devido às características geométricas dessa quádriga, todos os feixes de radiação são concentrados em um ponto, o foco [6].

Calhas parabólicas: são calhas reflexivas com seção transversal parabólica e, portanto, com foco em linha que coincide com um tubo que abriga o fluido absorvedor [6].



Fonte 1. Tipos de concentradores solares. (PENAFIEL, 2011)

2.2. Pasteurizador com base em concentrador solar

Uma aplicação promissora desse tipo de tecnologia está no desenvolvimento de pasteurizadores solares a serem implantados em áreas vulneráveis a contaminação ou com fontes de água sem potabilidade atestada.

Esses dispositivos, em suma, aproveitam o calor advindo de um concentrador para aquecer água contaminada por alguns instantes até uma determinada temperatura com intuito de mitigar ou eliminar microrganismos que caso ingeridos causariam danos à saúde humana.

Nesse sentido, uma questão relevante a se propor é qual tipo de coletor usar. Comparando a priori fatores como custo, facilidade de fabricação e rendimento e por não ser viável neste trabalho desenvolver um novo modelo, o coletor com base em calha parabólica se destaca dentre os outros. Além disso, é pertinente conhecer os parâmetros geométricos e físicos que influenciarão na captação e na concentração do recurso solar que dependem diretamente da localidade onde o equipamento será instalado. No âmbito deste trabalho será no nordeste brasileiro, mais especificamente, na cidade de Mossoró.

2.3. Parâmetros geométricos

Dentre todas as superfícies cônicas, os perfis parabólicos se destacam quanto às suas propriedades geométricas, sendo a mais peculiar delas a convergência de qualquer reta que toque sua superfície interna convergir diretamente em um ponto – no caso de uma superfície plana – ou em uma linha – perfis cilíndrico-parabólicos – respectivamente conhecidos como foco e linha focal [7]. A equação 1 define esse tipo de geometria no plano, enquanto a Figura 2 mostra sua representação gráfica e o efeito de reflexão.

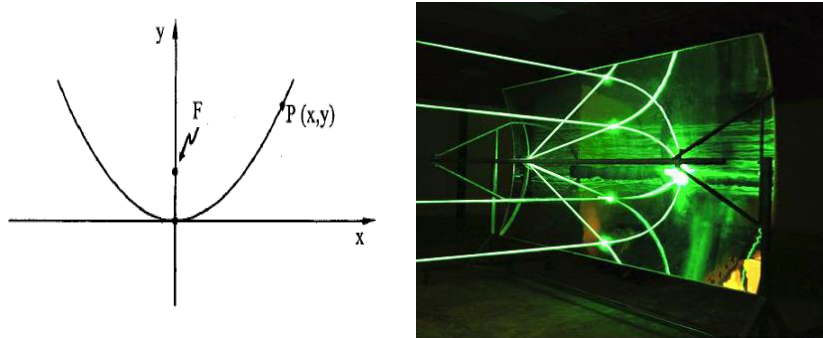


Figura 2. Gráfico de uma parábola (esquerda) e seu efeito reflexivo (direita). (GÜNTHER,2016)

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

Em se tratando de superfícies refletoras com esse perfil, em especial, os coletores parabólicos, existem diversos parâmetros a levar em consideração no momento de projetar para que atendam satisfatoriamente as condições de serviço. Dentre esses, destacam-se o comprimento da calha (l), sua largura ou abertura (a), distância focal (f) e, finalmente o ângulo de borda (ψ), mostrados na Figura 3 [7].

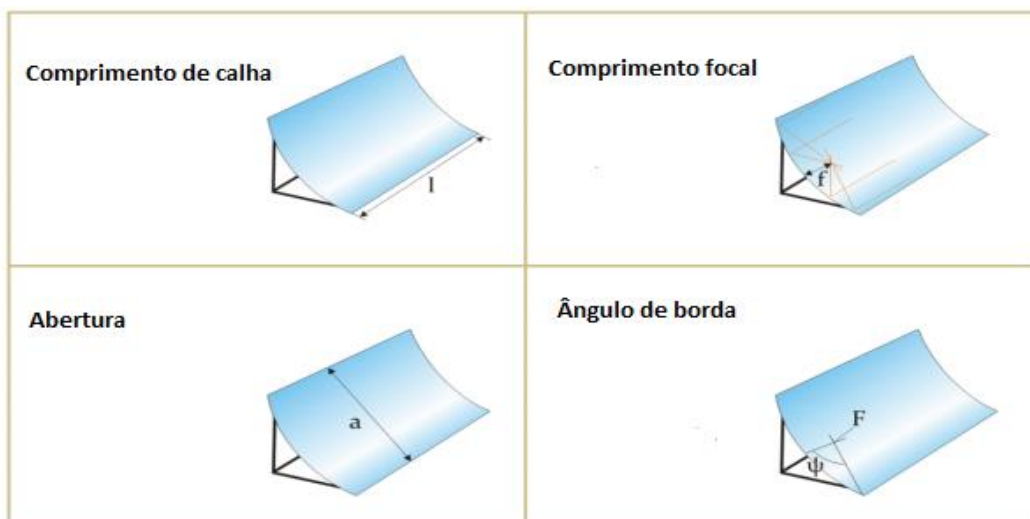


Figura 3. Parâmetros geométricos de relevância em coletores parabólicos. (GÜNTHER,2016)

O comprimento e a abertura da calha são fatores que determinam a área de abertura ($A_{ap,c}$), dimensão que engloba o espaço disponível para receber radiação. É uma grandeza diretamente proporcional a energia captada e deve ser dimensionada ponderando custos com materiais, massa da estrutura e a concentração geométrica (CG), parâmetro que estipula de forma ideal a quantidade de radiação que chega na linha focal, ou seja, no duto coletor a partir de uma proporção de áreas [7], mostradas na Figura 4.

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

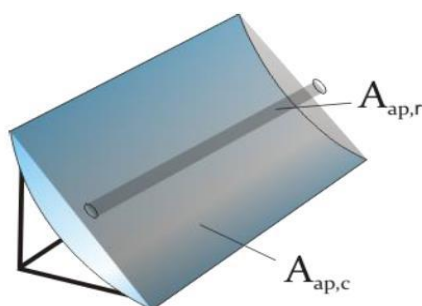


Figura 4: Representação das áreas de abertura ($A_{ap,c}$) e recepção ($A_{ap,r}$). (GÜNTHER,2016)

No que tange a distância focal, sua influência está diretamente relacionada ao grau de concavidade o qual terá a seção o que definirá o formato e a equação da seção, como mostrado na Figura 5. Sendo assim, quanto maior for esse parâmetro, menor serão as variações no grau de concavidade da parábola, enquanto que a distância entre o tubo receptor aumentará, o que contribui com perdas térmicas no processo de concentração devido a remoção de calor por convecção do ar nas vizinhanças. No entanto, se a distância focal for muito pequena, também ocorrerá prejuízo na concentração energética, já que feixes incidentes nas bordas mais externas da calha percorreram trajetos maiores e, consequentemente, se espalhem mais até chegar ao coletor [7].

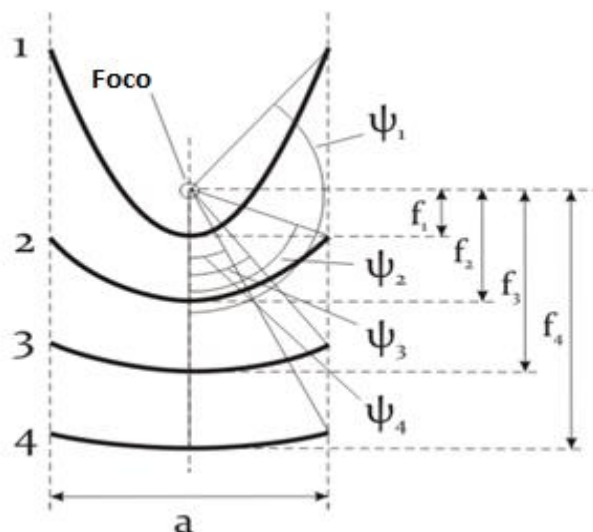


Figura 5. Formato de seção parabólica variando foco e ângulo de borda. (GÜNTHER,2016)

O ângulo de borda relaciona o arco entre a linha que liga o vértice ao foco e a que une a extremidade da parábola também até este ponto. A sua influência no projeto se mostra inversa as considerações feitas para o foco. Mantendo a abertura constante, variando distância focal e ângulo de borda, determina-se o diagrama abaixo, onde é facilmente comprovado o comportamento proposto para tais parâmetros isolados ou grosseiramente correlacionados [7].

2.4. Material reflexivo

No caso do material reflexivo, devem ser levados em consideração no momento da escolha variáveis como resistência às intempéries como o vento e a umidade, capacidade de refletir luz solar e, por último, mas não menos importante, seu custo. Baseando-se neste último parâmetro e nas premissas deste trabalho, são filtrados dois materiais que atendem de maneira satisfatória tais exigências, os filmes de alumínio e os filmes de espelhos baseados em prata. Apesar do primeiro material apresentar refletividade menor que a prata nos comprimentos de onda mais energéticos do sol, é facilmente moldável a superfícies com geometria complexa e custa bem menos que os filmes de prata, o que acaba compensando as perdas ópticas que gera [8]. Portanto, é cabível a escolha dos filmes de alumínio, apresentando boa refletividade e baixa absorbância na faixa com comprimento de onda mais energético do espectro solar, como mostrado na Figura 6.

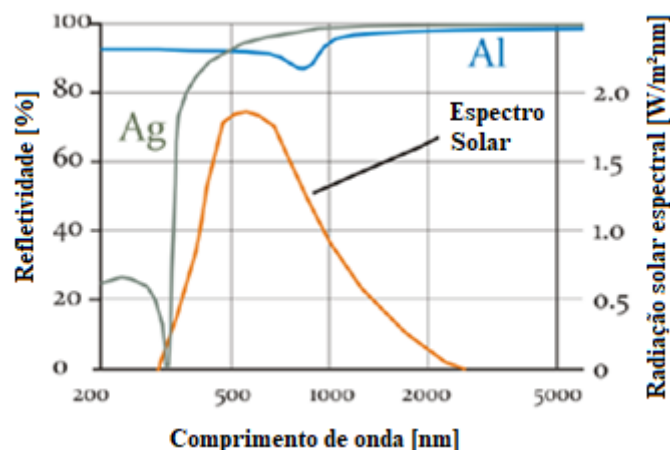


Figura 6. Refletividade do alumínio e da prata em relação ao espectro solar. (GÜNTHER,2016)

2.5. Tubo coletor

Este componente é fundamental quanto a garantia de um funcionamento eficaz do sistema, já que toda energia utilizada para aquecer a água irá transitá-lo. Sendo assim, deve ser confeccionado a partir de um material que assegure boa transferência térmica sem grandes perdas por irradiação ou convecção e que ainda assim seja economicamente viável. No entanto, materiais que agregam todas as características físicas desejadas são dispendiosos, o que leva, na maioria das aplicações, ao uso de tubos com alta absorbância e baixa emissividade envoltos em um invólucro de vidro ou acrílico, materiais que apresentam boa transmissibilidade e baixa refletividade [7]. Apesar desse artifício acrescentar perdas óticas ao sistema, potencializa o ganho térmico ao limitar transferência térmica por irradiação e condução e, portanto, há compensação. É sensato no âmbito deste trabalho selecionar uma liga de alumínio para o tubo absorvedor e acrílico para o invólucro.

2.6. Sistema de rastreamento e recurso solar

Um dos gargalos das tecnologias de concentração encontra-se na maneira como os raios solares incidem no plano dos coletores. Em síntese, a energia irradiada pelo sol viaja pelo espaço em um único “pacote” até chegar a atmosfera terrestre, onde se divide devido a presença dos elementos que a compõem, como partículas de água (nuvens) e gases [5]. Nesse sentido, toda a radiação que se dispersa é chamada de difusa, enquanto que a porção que não se desvia é denominada de direta. Diferentemente dos painéis fotovoltaicos, que usam radiação global, ou seja, direta e difusa, os concentradores aproveitam somente a fração direta. As porções de radiação são mostradas na Figura 7.



Figura 7. Decomposição da radiação solar. (TOLMASQUIM, 2016)

Desta forma, é imprescindível que o plano de abertura coletor acompanhe todo movimento do sol ao decorrer do dia de forma que os raios solares incidam o mais perpendicularmente possível, evitando perdas óticas associadas a desvios causados por aumento no ângulo de incidência σ_t [9]. Como ilustrado abaixo, as linhas em vermelho representam a parte da radiação perpendicular ao plano e as azuis não. Portanto, os desvios da linha focal são diretamente proporcionais aos desvios da linha focal. A Figura 8 mostra a influência desse desvio no grau ou fator de concentração (CR_g) da calha.

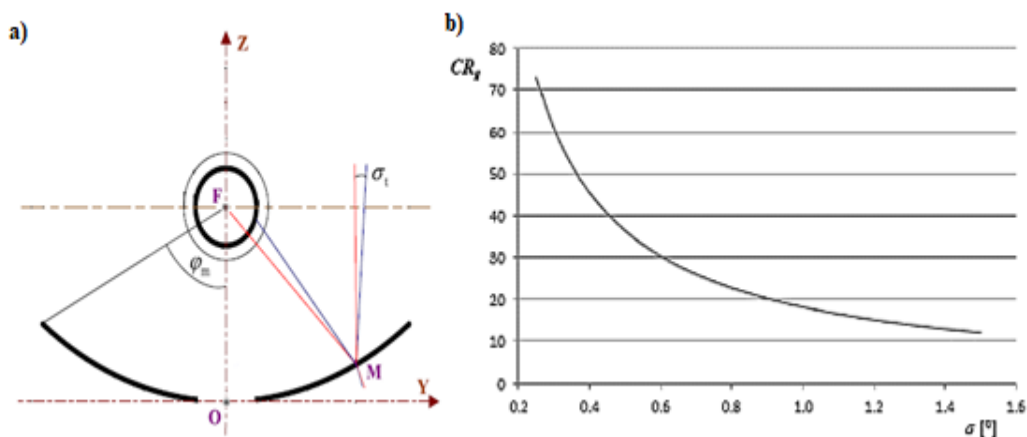


Figura 8. Influência do ângulo de incidência no fator de concentração da calha (b) e desvio causado por parâmetro (a). (PIERUCCI, 2013)

Para calhas cilíndrico parabólicas são usuais os sistemas de rastreamento com um grau de liberdade quanto a rotação. No caso, o eixo rotatório é paralelo a linha focal. Em se tratando de sistemas em pequena escala, é possível incluir ainda mais um grau de liberdade na calha, fazendo-a rotacionar em torno de um eixo perpendicular ao solo. Como não existem trabalhos relevantes quanto as vantagens da adição de um segundo grau de liberdade e não está no escopo deste texto discutir tal questão, o projeto de calha proposto contará somente com um grau de liberdade ao longo da calha, como mostrado nas vistas da Figura 9. Com essa configuração é possível alinhar o eixo rotativo na direção norte-sul ou leste-oeste. Escolhendo o primeiro posicionando, o rastreo ocorre ao longo do arco leste-oeste, o que agregará perdas ópticas devido ao ângulo de incidência ao meio-dia e ganhos no nascer e no pôr do sol. Para o segundo caso, ocorrerão perdas no anoitecer e no amanhecer, enquanto que a eficiência será máxima ao meio-dia. Em um período de um ano, o alinhamento norte-sul aproveita um pouco mais de energia do que o leste-oeste, porém o último coleta de forma mais uniforme durante o mesmo espaço de tempo [2]. É importante ressaltar que essa é uma análise geral para o desempenho dessas configurações, sendo necessária uma abordagem bem mais complexa da posição do sol para abranger de forma satisfatória a efetividade pontual durante períodos mais curtos de tempo para cada tipo de rastreamento. Desta forma, a calha será desenvolvida considerando um posicionamento leste-oeste pela homogeneidade energética que proporciona durante o ano.

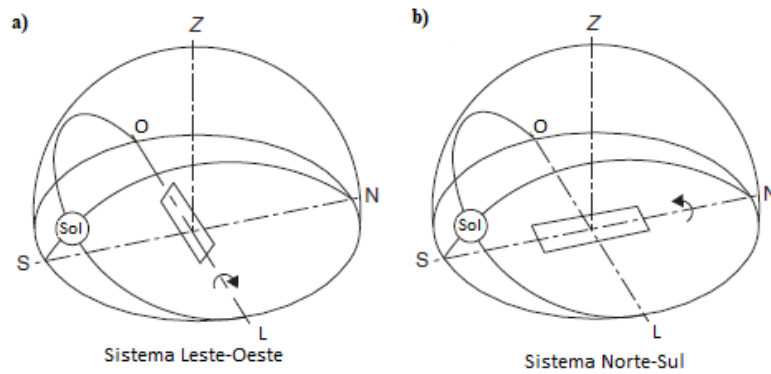


Figura 9. Rastreamento ao longo do eixo leste-oeste (a) e norte-sul (b). (KALOGIROU,2014)

2.6. Eficiência dos concentradores

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

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

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

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

Ao contrário da energia fornecida, a potência útil é sensível à diversos parâmetros físicos e químicos. Dentre os mais relevantes estão: a refletância do material da calha (ρ), a transmitância do invólucro do coletor (τ), a absorvância do coletor (α), o coeficiente de transferência térmica por convecção entre o ar e o invólucro (h), do fator concentração geométrica da calha (CG), da diferença de temperatura entre o fluido aquecido (T_c) e o ambiente (T_a) e da emissividade do coletor (ε). Uma das equações que relaciona de forma mais concreta todas essas variáveis baseia-se na norma ASHRAE 93-2010 [10] que elenca metodologias para ensaios de eficiência em concentradores solares, tal expressão é mostrada abaixo.

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

2.7. Modelo para otimização

Com base na equação para eficiência apresentada, é possível montar um modelo um tanto quanto abrangente para determinar quais as dimensões de calha fornecem a melhor resposta quando submetidas a certa condição

solar. Definidas grandezas ópticas e térmicas que dependem da escolha dos materiais e das condições ambientais do local da instalação, resta estipular uma faixa de temperatura sob a qual os principais microorganismos presentes na água se degradem, tornando-a potável. Em posse desses valores condicionados, é possível variar o fator de concentração geométrica da calha e, por conseguinte, definir qual é a melhor calha associada ao seu tubo coletor para tais condições de contorno. Nesse sentido, se torna conveniente correlacionar com o CG o máximo de parâmetros da seção parabólica da calha para analisar sua influência no processo de otimização. Isso pode ser feito expressando a abertura do concentrador em função de tais variáveis. Usando geometria analítica simples [11], é possível estabelecer tais equações.

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

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

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

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

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

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

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

2.8. Condições de contorno e método para solução

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

Tabela 1. Condições de contorno para a otimização. (Autoria própria)

Variável	Intervalo ou valor	Material/condição	Justificativa
Transmitância do invólucro (τ)	0,92	Acrílico	-
Refletância da calha (ρ)	0,95	Filme de alumínio	-
Absorbância do coletor (α)	0,97	Alumínio (pintado de preto)	-
Emissividade do coletor (ε)	0,90	Alumínio (pintado de preto)	-
Coeficiente de transferência térmica (h)	10 W/(m ² K)	30 °C de diferença coletor e invólucro	-
Ângulo de borda (ψ)	45° ≤ ψ ≤ 90°	-	Faixa recomendável [9]
Diâmetro do coletor (d)	12,5 mm ≤ d ≤ 25,4 mm	-	Tubos comerciais
Comprimento focal (f)	0,2 m ≤ f ≤ 1,5 m	-	Compactabilidade/faixa usual [9]
Temperatura do ambiente (T_a)	30°C ≤ T_a ≤ 40°C	-	Faixa de temperaturas corriqueiras em Mossoró/RN
Temperatura do coletor (T_c)	70°C ≤ T_c ≤ 100°C	-	Faixa de temperatura de degradação de microorganismos nocivos [12].

Em se tratando da irradiação direta, não foi possível obter dados para a cidade de Mossoró em específico, já que ao contrário da global, exige métodos mais rebuscadas para ser mensurada. Neste caso, optou-se por usar valores disponíveis para a localidade mais próxima, no caso, Fortaleza/CE, que além do mais, possui condições atmosféricas semelhantes à cidade alvo do estudo. Os dados foram obtidos a partir do software *System Advisor Model* (SAM), disponibilizado pelo *National Renewable Energy Laboratory* [13]. O SAM disponibiliza dados médios para irradiação normal direta (DNI) em função da hora local em cada mês, além de médias anuais e valores máximos mensais. Neste caso, os meses que se sobressaem energeticamente tanto em relação à média quanto a valores absolutos são setembro e outubro com valores máximos de DNI entorno de 895 e 904 W/m^2 , respectivamente, e valores médios para os dias com maior irradiação, disponíveis nos gráficos abaixo.

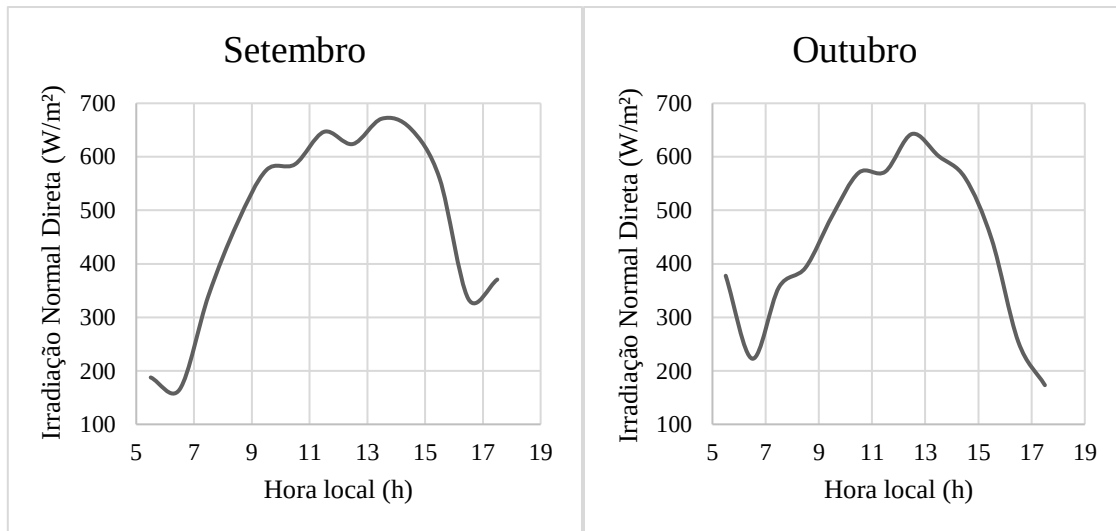


Figura 10: Irradiação solar média para os dias de maior incidência em setembro (esquerda) e outubro (direita). (NREL, 2017).

Para a otimização, serão utilizados os dados do mês com maior irradiação média, ou seja, setembro. Pelo gráfico, observa-se que o pico de DNI ocorre entre às 13h e 15h. Portanto, a energia total disponível neste intervalo corresponde área sob a curva. Como não há uma expressão analítica para a curva, a integração torna-se ineficiente, adotando-se então uma aproximação por uma soma de retângulos. Logo:

$$G \cong 4524 \text{ kJ}/m^2$$

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

2.9. Resultados e discussão

As respostas foram obtidas depois de 44 iterações, satisfazendo uma tolerância $\zeta = 1 \times 10^{-6}$. Nessas condições, os parâmetros obtidos para maior eficiência são representados na Tabela 2.

Tabela 2. Variáveis obtidas na otimização.

Variável	Valor
Eficiência (η)	28,151 %
Ângulo de borda (ψ)	63,6155°
Diâmetro do coletor (d)	12,501 mm
Comprimento focal (f)	0,60458 m
Temperatura do ambiente (T_a)	39,9969 °C
Temperatura do coletor (T_c)	70 °C

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

$$y = 0,413510205x^2 \quad (10)$$

Por fim, uma maneira de calcular a quantidade de água pasteurizada é dada por uma relação entre as quantidades de calor necessárias para aquecê-la à 70 °C e manter por 15 min, condições mínimas para pasteurizar [12]. A energia necessária para tal (Q_e) pode ser estimada pela equação 11.

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

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

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

Novamente devido a premissa de ser compacta e ao fato da influência do comprimento ser trivial em comparação a seção parabólica, adotou-se um valor de 1,5 m, fornecendo, conseqüentemente, cerca de 17 l de água pasteurizada nas 2 h decorridas entre às 13 h e 15 h da condição usada na otimização. Em geral, a eficiência condiz com coletores de pequeno porte já desenvolvidos utilizando critérios semelhantes, como feito por SILVA (2015) que obteve 27,7% de eficiência. BIGONI (2013) fez testes com pasteurização de água utilizando um coletor cilíndrico parabólico na cidade de Dübendorf na Suíça, obtendo no máximo 66 litros do líquido pasteurizado por dia. Na Figura 11, são apresentadas as quantidades de água obtidas para a calha proposta neste trabalho em função do valor médio diário de DNI para os dias com maior irradiação em cada mês. Em comparação com literatura citada, esses valores se mostram significativamente maiores provavelmente devido às condições solares mais favoráveis da região analisada e maior temperatura de inativação usada em [15].

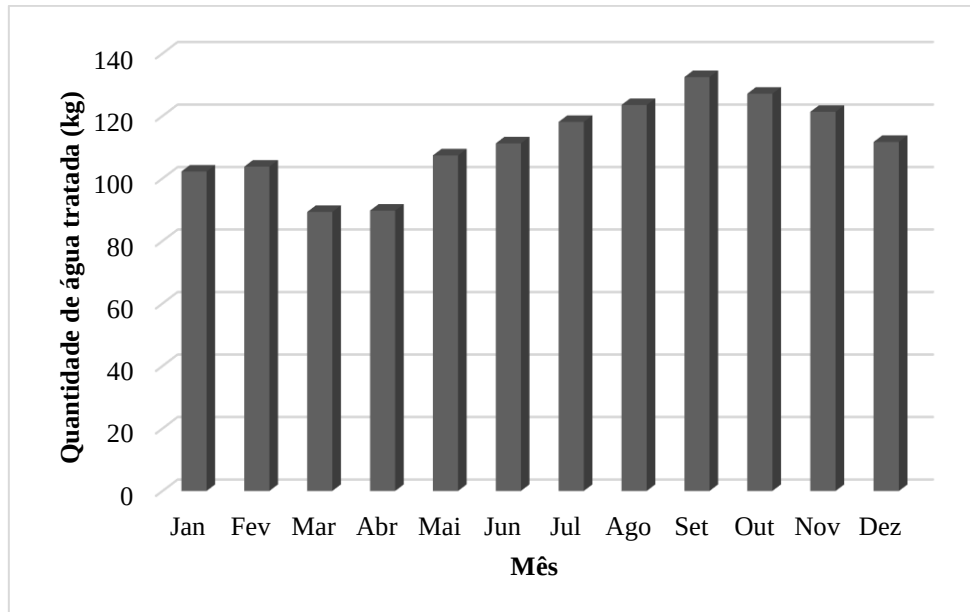


Figura 11: Quantidade de água pasteurizada. (Autoria própria)

3. CONCLUSÕES

Em geral, o modelo de calha cilíndrico parabólica se mostra condizente com o esperado: compacta e eficiente, com base em materiais de baixo custo fáceis de trabalhar em manufatura. Portanto, sua utilização se mostra viável na região de Mossoró como uma alternativa a remediação a pasteurização de água contaminada. No campo das análises futuras, pretende-se construir um protótipo e analisar o grau de influência de cada variável na eficiência durante períodos de tempo maiores, determinando a validade do método utilizado. Neste sentido, o modelo apresentado, pode ser expandido a qualquer região do mundo, servindo como ferramenta de projeto para a geometria das calhas parabólicas, um dos gargalos que mais encarecem esse tipo de tecnologia e suas aplicações.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Síntese de indicadores sociais: uma análise das condições de vida da população brasileira. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv98965.pdf>>. Acesso em: 3 jun. 2018.
- [2] KALOGIROU, Soteris. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. 2ª ed. Oxford: Elsevier, 2014. p. 51 e p. 543-557.
- [3] SILVA, Roberta A. e; SILVA, Vicente de P. R. da; CAVALCANTI, Enilson P.; SANTOS, David N. dos. Estudo da variabilidade da radiação solar no Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.14, n.5, p.501–509, 2010.
- [4] CABRAL, Isabelle de Souza; TORRES, Adriana Cazelgrandi; SENNA, Pedro Rocha. Tecnologias Solares. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 10., 201, Salvador. Energia Solar – Análise comparativa entre Brasil e Alemanha. Salvador: 2013. p. 2-4.
- [5] TOLMASQUIM, Mauricio T. Geração fotovoltaica. In: TOLMASQUIM, Mauricio T. (Org.). Energia Renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. Rio de Janeiro: EPE, 2016. cap. 4, p. 334-336.
- [6] PENAFIEL, Rafael Andrés Soria. Cenários de geração de eletricidade a partir de geradores heliotérmicos no Brasil: a influência do armazenamento de calor e da hibridização. 2011. 14-17 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- [7] GÜNTHER, Matthias; JOEMANN, Michael; CSAMBOR, Simon (Org.). Parabolic Trough Technology. In: Advanced CSP Teaching Materials. Stuttgart, Germany: [s.n.], 2016. cap. 5, p. 1-88.
- [8] JAGOO, Zafrullah. Solar Concentrators. In: JAGOO, Zafrullah. Tracking Solar Concentrators: a low budget solution. Réduit, Mauritius: Springer, 2013. cap. 4, p. 54-55.
- [9] PIERUCCI, G. et al. Shape Optimization for Parabolic Troughs Working in Non-ideal Conditions. Energy Procedia, Cancun, Mexico, v. 57, p. 2231-2240, 2013.
- [10] American Society Of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Professional association. Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors. Atlanta: [s.n.], 2017. 42 p.
- [11] WINTERLE, Paulo. Cônicas: Parábola. In: WINTERLE, Paulo. Vetores e Geometria Analítica. São Paulo-SP: Pearson Education, 2007. cap. 8, p. 162-177.
- [12] RODRIGUES, Danielle Gonçalves. Desinfecção da água por pasteurização solar (sopas) em comunidades rurais. 2011. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola na área de concentração Água e Solos) - Faculdade De Engenharia Agrícola, Unicamp, Campinas-SP, 2011.
- [13] National Renewable Energy Laboratory (NREL). Governmental. System Advisor Model (SAM). Version 2017.9.5. [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: <<https://sam.nrel.gov/download>>. Acesso em: 25 jul. 2018.
- [14] SILVA, Leonardo Pereira De Lucena. Desenvolvimento de um coletor solar cilíndrico parabólico para baixas e médias temperaturas. 2015. 244 p. Dissertação (Mestrado em análise e projeto de sistemas termomecânicos) - Centro de ciências e tecnologia, UFCG, Campina Grande-PB, 2015.
- [15] BIGONI, Riccardo et al. Solar water disinfection by a Parabolic Trough Concentrator (PTC): flow-cytometric analysis of bacterial inactivation. Journal of Cleaner Production, [S.l.], 15 mar. 2014. 67, p. 62-71.