ANÁLISE ENERGÉTICA E DESEMPENHO DE UM COLETOR SOLAR CILÍNDRICO PARABÓLICO AUXILIADO POR SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR

ENERGY ANALYSIS AND PERFORMANCE OF A PARABOLIC CYLINDRICAL SOLAR COLLECTOR AIDED BY SOLAR TRACKING SYSTEM

PORTELA, Lino Wagner Castelo Branco^{1*}; ALMEIDA, Ana Fabíola Leite²; BARBOSA, Erilson de Sousa³; CEZAR, Kleber Lima⁴; OLIVEIRA, Patrick Abreu⁵

^{1,2} Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica, Campus do Pici, Fortaleza - CE, Brasil

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Itapipoca - CE, Brasil

^{4,5} Universidade Federal do Piauí, Departamento de Engenharia Mecânica, Grupo Interdisciplinar de Pesquisa em Energia Solar (GIPES), Campus Petrônio Portella, Teresina - PI, Brasil

* Autor correspondente
e-mail: linowcbp@gmail.com

Received 13 November 2019; received in revised form 20 December 2019; accepted 10 January 2020

RESUMO

Ao longo dos últimos anos, países como Brasil, Estados Unidos, Alemanha e China vêm recebendo grandes investimentos para o avanço da utilização de fontes energéticas renováveis como, por exemplo, a energia solar, biomassa e eólica. Isso tem ocorrido devido ao crescimento das demandas por energia em função do aumento populacional e evolução das atividades industriais. A energia solar pode ser aproveitada com a utilização de concentradores solares que são comumente utilizados em sistemas solares térmicos nos quais o fluido de trabalho atinja temperaturas mais elevadas do que as que podem ser obtidas em outros coletores. Esses concentradores são os responsáveis por proporcionarem o fornecimento de energia térmica. Esta pesquisa analisou a influência energética da tecnologia Concentrador Solar Parabólico auxiliado por um sistema de rastreamento solar, levando em consideração seu balanço de energia e o cálculo de eficiência térmica. O concentrador apresentou uma eficiência óptica de 81 % e conseguiu atingir valores de eficiência térmica média entre 21,8 % e 24,7 % sob condições de radiação solar máxima entre 900 W/m² e 990 W/m². A temperatura do tubo absorvedor utilizado para receber a concentração dos raios solares alcançou temperaturas entre 80 °C e 98,6 °C, proporcionando a temperatura do fluido de trabalho do sistema atingir valores acima de 100 °C. Esses resultados apresentam a capacidade desse tipo de coletor solar de fornecer energia para aplicações térmicas como, por exemplo, aquecimento de água para processos industriais ou domésticos, desidratação e secagem de alimentos, refrigeração, dessalinização térmica e microgeração de energia elétrica. Além disso, a eficiência térmica (entre 21,8 % e 24,7 %) mostrou-se satisfatória quando levado em consideração o tipo de concentrador, o que também valida o sistema eletrônico de rastreamento já que ele conseguiu acompanhar o movimento relativo do sol e favorecer o aumento da eficiência térmica do sistema.

Palavras-chave: Fontes energéticas renováveis, Energia solar, Concentradores solares, Balanço de energia, Eficiência térmica.

ABSTRACT

Over the last few years, countries such as Brazil, the United States, Germany, and China have been receiving significant investments to advance the use of renewable energy sources, such as solar energy, biomass and wind. This has been due to the growing demand for electricity due to population increase and the evolution of industrial activities. Solar energy can be enjoyed by using solar concentrators that are commonly used in solar thermal systems where the working fluid reaches higher temperatures than can be obtained from other collectors. These concentrators are responsible for providing the thermal energy supply. This research analyzed the energy influence of Parabolic Solar Concentrator technology aided by a solar tracking system, taking into account its energy balance and thermal efficiency calculation. The concentrator had an optical efficiency of 81 % and was able to achieve average thermal efficiency values between 21.8 % and 24.7 % under maximum solar radiation conditions between 900 W/m² and 990 W/m². The temperature of the absorber tube used to receive the concentration of sunlight reached temperatures between 80 °C and 98.6 °C, allowing the system working fluid a

temperature to reach values above 100 °C. These results show the ability of this type of solar collector to provide power for thermal applications such as heating water for industrial or domestic processes, food dehydration, and drying, refrigeration, thermal desalination and microgeneration of electricity. Besides, the thermal efficiency (between 21.8 % and 24.7 %) was satisfactory when considering the type of concentrator, which also validates the electronic tracking system as it was able to track the relative movement of the sun and favor the increase of thermal efficiency of the system.

Keywords: *Renewable energy sources, Solar energy, Solar concentrators, Energy balance, Thermal efficiency.*

1. INTRODUÇÃO:

Ao longo dos últimos anos, países como Brasil, EUA, Alemanha e China, vêm recebendo grandes investimentos para o desenvolvimento de fontes energéticas renováveis como, por exemplo, a energia solar, biomassa e energia eólica (IEA, 2017). As fontes renováveis, quando comparadas aos combustíveis 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 2019, a principal fonte de energia do Brasil ainda é proveniente de hidrelétricas (60,8 %), como também de combustíveis fósseis, sendo os mais utilizados o gás natural (7,7 %), petróleo (5,1 %) e carvão mineral (1,9 %).

O valor comercial de 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). Segundo Tiepolo *et al.* (2016), a capacidade de geração de energia elétrica por hidrelétricas vem caindo a cada ano – cerca de 20 pontos percentuais em relação ao total gerado, nos últimos 10 anos.

A energia solar é notavelmente a fonte energética de maior abundância, e considerando o grande potencial energético solar do Brasil, a aplicação dessa energia pode representar estimada contribuição na evolução sustentável da sociedade (Santos *et al.*, 2018). O número de aplicações da energia solar é diversificado, levando em consideração os diversos níveis de temperatura e demandas por energia (Schlecht; Meyer, 2012). No entanto, o recurso solar pode ser altamente variável em algumas regiões, seja pela posição das nuvens, pelos gases presentes na atmosfera, como também outros fatores naturais. Com essa variação, problemas relacionados à produção e confiabilidade de

sistemas solares podem existir (Inman *et al.*, 2013). Isso justifica a necessidade de muitos sistemas solares serem auxiliados por sistemas de rastreamento solar. A aplicação de sistemas de rastreamento solar afetam significativamente o aumento da eficiência, como também a utilização de matérias com boa refletividade e condutividade (Bazak; Sazak, 2014; Sekhar, 2015).

Uma das formas de se aproveitar a energia solar é através da tecnologia Concentrador Solar Parabólico (CSP), eles são amplamente explorados para produzirem calor a grandes níveis de temperatura (Kalogirou, 2014; Azzouzi *et al.*, 2018). As aplicações desse tipo de energia podem ser desde processos agropecuários, dessalinização de água, processos industriais e até mesmo refrigeração e climatização (Pereira *et al.*, 2017). Em trabalhos como Fernández-García (2010), Palenzuela *et al.* (2015), Arunkumar *et al.* (2016), Giglio e Lamberts (2016), Montenon *et al.* (2017), Fan *et al.* (2018), Elakhdar *et al.* (2019) e Abdessemed *et al.* (2019) são apresentados exemplos de aplicações com esse tipo de energia. O pesquisador Werner (2006) constatou que em 32 países da Europa, 57 % dos processos de aquecimento industrial demandavam fluidos em temperatura próxima de 400 °C, portanto, a utilização de concentradores solares parabólicos também representa uma economia de energia elétrica para o setor industrial.

Este trabalho apresenta o potencial energético de uma aplicação solar e contribui para o desenvolvimento da pesquisa na área de energias renováveis. Algumas pesquisas buscaram investigar o aumento da eficiência térmica de concentradores solares parabólicos, conforme os trabalhos de Duff *et al.* (1975), Schwarzer *et al.* (2000), Price *et al.* (2002), Kalogirou (2002), Lupfert (2007), Sintali *et al.* (2014), Al-Nimr e Dahdolan (2015), Behar *et al.* (2015) e Hassan *et al.* (2019). O objetivo desta pesquisa foi analisar a capacidade energética e o desempenho de um coletor solar cilíndrico parabólico auxiliado por um sistema de rastreamento a partir da utilização de energia solar.

2. MATERIAIS E MÉTODOS:

2.1. 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 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 81 %. A Figura 1 apresenta o concentrador solar parabólico.

Figura 1. O concentrador solar parabólico.

2.2. O Sistema de Rastreamento Solar

Para rastrear o 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, associado a um módulo de dois sensores de luminosidade NORPS-12 do tipo LDR (*Light Dependent 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 precisão de rastreamento solar é aumentada com o auxílio de eletrônica sensível à luz (Jagoo, 2013). Na Figura 2 é ilustrada a superfície de um LDR.

Figura 2. A superfície de um LDR.

O módulo com os sensores LDR's 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 (Barbosa, 2009). A principal vantagem dos sensores LDR's 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 às pequenas variações de luminosidade (Prinsloo; Dobson, 2014). A Figura 3 apresenta o módulo de sensores com os LDR's utilizados no sistema de rastreamento do concentrador solar parabólico.

Figura 3. Módulo de sensores de luminosidade.

Os LDR's localizados nos planos inclinados (45° em relação à base) são responsáveis por fornecer a resistência elétrica que determinará em qual sentido o concentrador deverá girar.

2.3. Os Sensores e a Instrumentação para Coleta de Dados

Foram coletados dados de temperatura na parede externa do tubo 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 – 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 sensores termopares, o primeiro medindo a temperatura de entrada da água que alimentava o sistema, outros três foram fixados ao longo do tubo e o último na saída do sistema medindo a

temperatura final. Já a aquisição dos dados de radiação solar (W/m^2), ocorreu a partir de um sensor piranômetro Kimo™ – modelo CR 110, esse piranômetro apresenta uma faixa de leitura de 0 a 1500 W/m^2 (precisão de 5%). A Figura 4 ilustra a localização desses sensores.

Figura 4. Localização dos sensores termopares e do piranômetro.

2.4. Transmissão de movimento para o coletor solar

Na transmissão de movimento, capaz de movimentar 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 5 apresenta o motor de passo.

Figura 5. Motor de passo bipolar.

2.5. Balanço de Energia no Coletor Solar

A análise térmica do desempenho do tubo absorvedor 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, propriedades ópticas e também condições atmosféricas. A energia, proveniente das propriedades ópticas, 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 pela superfície do tubo absorvedor. Essa energia é conduzida pelo tubo e transferida ao fluido pelo fenômeno de 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 6 é mostrado o balanço de energia em uma seção transversal do tubo e também o modelo de resistência térmica.

Figura 6. Balanço de Energia e Resistência Térmica.

Com base na Figura 6, é possível equacionar a conservação de energia do sistema, as equações são:

$$\dot{q}_{1\text{conv}} = \dot{q}_{1\text{cond}} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\dot{q}_{\text{Sol}} = \dot{q}_{2\text{conv}} + \dot{q}_{\text{rad}} + \dot{q}_{1\text{cond}} + \dot{q}_{2\text{cond,est}} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\dot{q}_{\text{perda}} = \dot{q}_{2\text{conv}} + \dot{q}_{\text{rad}} + \dot{q}_{2\text{cond,est}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Os termos do equacionamento são definidos na Tabela 1.

2.6. Eficiência Térmica

A eficiência térmica é o termo utilizado na termodinâmica que procura quantificar uma estimativa do nível de aproveitamento em um

sistema que envolve transferência de calor (Moran *et al.*, 2005; Çengel; Ghajar, 2015). 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:

$$\eta_t = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{I} \quad (\text{Eq. 4})$$

em que $\dot{Q}_{\text{útil}}$ 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 (Kreith; Bohn, 2003; Incropera *et al.*, 2008).

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = \dot{m} \cdot C_{\text{med}} \cdot (T_{\text{ent}} - T_{\text{sai}}) \quad (\text{Eq. 5})$$

$$I = G \cdot A_a \quad (\text{Eq. 6})$$

onde $\dot{m}$ representa a vazão volumétrica do fluido de trabalho, C_{med} o calor específico médio 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).

3. 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). O funcionamento do concentrador foi analisado sob duas condições. A primeira com a presença de muitas nuvens e a segunda com nuvens em intervalos pouco menores de tempo em relação à primeira. A Figura 7 apresenta a distribuição de radiação solar, a temperatura média na superfície do tubo absorvedor e a temperatura de entrada e saída do fluido em um dia com muitas nuvens.

É possível perceber que apesar da incidências de muitas nuvens os índices de radiação solar teve períodos em que permaneceu próximo de 800 W/m² em média, conseguindo chegar em 900 W/m². Em relação à temperatura do tubo, conseguiu atingir temperatura de 80 °C, nesse ponto a temperatura da água ficou acima de 100 °C – deixando sua fase líquida e passando a ser 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 8 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 menos nuvens. Nesse período os índices de radiação solar teve momentos em que permaneceu próximo a uma incidência 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 9 e 10 apresentam o resultado das eficiências ao longo do período.

No primeiro período (Figura 9), a eficiência térmica do concentrador solar variou entre diversos picos, como o representado no intervalo de 41,9 % no horário de 15h29min e 0,6 % no horário de 15h30min, essa variação se deve principalmente à constante presença de nuvens nesse período. Apesar disso o concentrador conseguiu manter sua eficiência térmica média em 21,8 %.

No segundo período (Figura 10), a eficiência térmica do concentrador variou entre picos de 40 % e 6 %, como no período de 12h35min e 12h38min. O concentrador conseguiu manter sua eficiência média em 24,7 %.

4. CONCLUSÕES:

A partir da pesquisa realizada, foi possível constatar que o concentrador solar parabólico apresentou desempenho satisfatório nos períodos em que a radiação solar se manteve acima de 700 W/m² e também na presença de poucas nuvens sobre o sistema. Em condições como essa, a temperatura do tubo absorvedor apresentou variações máximas entre 80 °C e 98,6 °C, tornando possível a temperatura do fluido de trabalho atingir valores acima de 100 °C, o que torna capaz o coletor solar de fornecer energia para aplicações de térmicas como, por exemplo, aquecimento de água para processos industriais ou residenciais, desidratação e secagem de alimentos, refrigeração, dessalinização térmica e

microgeração de eletricidade.

Com a aplicação do concentrador solar de pequeno porte, dos sensores de instrumentação e do balanço de energia desenvolvido, foi possível determinar a eficiência térmica do sistema. A eficiência média alcançada entre 21,8 % e 24,7 % é considerada satisfatória, quando levado em consideração o tipo de concentrador ser o parabólico.

O sistema eletrônico de rastreamento utilizando LDR's e a placa arduino, apresentou bom desempenho, pois conseguiu acompanhar o movimento relativo do sol e favorecer o aumento de eficiência térmica do sistema.

5. AGRADECIMENTOS:

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro na forma de bolsa de estudos e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela promoção da pesquisa por meio do edital nº 18/2013 MCTI / CNPq / SPM-PR / Petrobras - Meninas e jovens fazendo ciências exatas, engenharia e computação.

6. REFERÊNCIAS:

1. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Matriz de Energia Elétrica*. **2019**.
2. Abdessemed, A., Bougriou, C., Guerraiche, D., Abachi, R. *Renewable Energy*, **2019**, 132, 1134-1140.
3. Al-Nimr, M.A., Dahdolan, M.E. *Solar Energy*, **2015**, 114, 8-16.
4. Arunkumar, T., Velraj, R., Denkenberger, D.C., Sathyamurthy, R., Kumar, K.V., Ahsan, A. *Renewable Energy*, **2016**, 88, 391-400.
5. Azzouzi, D., Bourorga, H.E., Belainine, K.A., Boumeddane, B. *Renewable Energy*, **2018**, 125, 495-500.
6. Barbosa, E.S. Desenvolvimento de um Sistema de Controle para Concentradores Parabólicos de Baixo Custo Aplicados à Refrigeração. Dissertação de mestrado (UFC), **2009**.
7. Bazak, O.D., Sazak, B.S. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, **2014**.
8. Behar, O., Khellaf, A., Mohammedi, K. *Energy Conversion and Management*, **2015**, 106, 268-281.
9. Çengel, Y.A., Ghajar, A.J. *Heat and Mass Transfer: fundamentals & applications*. New York: McGraw-Hill Education, **2015**.
10. Dally, J.W., Riley, W.F., McConnel, K.G. *Instrumentation for Engineering Measurements*. John Wiley & Sons, Inc., **1993**.
11. Duff, W.S., Lameiro, G.F., Löf, G.O.G. *Solar Energy*, **1975**, 17, 47-58.
12. Elakhdar, M., Landoulsi, H., Tashtoush, B., Nehdi, E., Kairouani, L. *A combined thermal system of ejector refrigeration and Organic Rankine cycles for power generation using a solar parabolic trough*. *Energy Conversion and Management*, **2019**.
13. Fan, M., Liang, H., You, S., Zhang, H., Yin, B., Wu, X. *Applied Energy*, **2018**, 100-111.
14. Fernández-García, A., Zarza, E., Valenzuela, L., Pérez, M. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **2010**, 14, 1695-1721.
15. 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**.
16. 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. *Renewable Energy*, **2018**, 126, 1126-1140.
17. Giglio, T., Lamberts, R. *Energy and Buildings*, Lausanne, **2016**, 130, 434-442.
18. Hassan, H., Ahmed, M.S., Fathy, M. *Renewable Energy*, **2019**, 135, 136-147.
19. 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**.
20. Inman, R.H., Pedro, H.T.C., Coimbra, C.F.M. *Prog. Energy Combust. Sci*, **2013**, 39, 535-576.
21. International Energy Agency. *Key World Energy Statistics 2017*. Paris, **2017**.
22. Jagoo, Z. *Tracking Solar Concentrators – A Low Budget Solution*. Springer, **2013**.
23. Kalogirou, S.A. *Energy*, **2002**, 27, 813-830.
24. Kalogirou, S.A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press,

2014.

25. Kreith, F., Bohn, M.S. *Princípios de Transferência de Calor*. Pioneira Thomson Learning, **2003**.
26. Lupfert, E.E., Pottler, K., Ulmer, S., Riffelmenn, K.J., Neumann, A., Schiricke, B. J. *Sol. Energy Eng*, **2007**, 129, 147-152.
27. 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**.
28. Montenon, A.C., Fylaktos, N., Montagnino, F., Paredes, F., Papanicolas, C.N. *Concentrated Solar Power in the Built Environment*. AIP Conference Proceedings, **2017**.
29. Palenzuela, P., Zaragoza, G., Alarcón-Padilla, D.C. *Energy*, **2015**, 82, 986-995.
30. 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*. São José dos Campos: INPE, **2017**.
31. Price, H., Lupfert, E., Kearney, D., *et al.* *J. Sol. Energy Eng*, **2002**, 124 (5), 109-125.
32. Prinsloo, G., Dobson, R. *Solar tracking*. Stellenbosch University, **2014**.
33. 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**.
34. Schaeffer, R., *et al.* [R]evolução Energética: Rumo a um Brasil com 100 % de energias limpas e renováveis. São Paulo, **2016**.
35. Schlecht, M., Meyer, R. Site selection and feasibility analysis for concentrating solar power (CSP) systems. Lovegrove, K., Stein, W. *Concentrating solar power technology*. Cambridge, UK: Woodhead, **2012**, Cap. 4.
36. Schwarzer, K., Vieira, M.E., Farber, C. *Solar termal desalination system with heat recovery*. Euromed 2000, Jerbas, Tunisia, **2000**.
37. Sekhar, T. *International Journal of Novel Research in Electrical and Mechanical Engineering*, **2015**, 2, 38-45.
38. Sintali, I.S., Egbo, G., Dandakouta, H. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, **2014**, 3, 25-33.
39. Tiepolo, G.M., Urbanetz, J., Pereira, E.B., Pereira, S.V., Alves, A.R. *Energia solar no Estado do Paraná – Potencial, barreiras e políticas públicas*. X CBPE, Gramado, **2016**.
40. Werner, S. *The European heat market, work package 1*. Euroheat & Power, **2006**.

Tabela 1. Termos do equacionamento do balanço de energia

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

Figura 7. Radiação solar e temperatura sob muitas nuvens.

Figura 8. Radiação solar e temperatura com a presença de nuvens em intervalos menores

Figura 9. Eficiência térmica do concentrador solar sob muitas nuvens.

Figura 10. Eficiência térmica do concentrador solar com a presença de nuvens em intervalos menores.