

## UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE CONCENTRADORES SOLARES DO TIPO LINEAR FRESNEL

Roberto Bittar Bigonha, rb.bigonha@gmail.com<sup>1</sup>

Dario Gerardo Fantini, fantinidario@gmail.com<sup>1</sup>

Mário Benjamim Baptista de Siqueira, mariosiqueira@unb.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília

**Resumo.** Na categoria de energias renováveis, o uso da energia solar tem ganhado bastante espaço. O número de estudos acerca da otimização e do aproveitamento desse tipo de energia tem crescido consideravelmente. O uso de concentradores pode aumentar o aproveitamento de energia pelas células solares. Este trabalho apresenta uma revisão sistemática sobre o desenvolvimento dos trabalhos publicados sobre concentradores solares do tipo linear Fresnel. As buscas foram realizadas nas bases Scopus e Web of Science e mostram a evolução do número de artigos publicados acerca do tema e o desenvolvimento de sistemas de concentração fotovoltaicos-térmicos ao longo dos anos.

**Palavras chave:** Energia Solar, Coletor Solar, Refletor Linear Fresnel, Sistema Fotovoltaico e Térmico.

**Abstract.** In the department of renewable energy, the use of solar energy has been gaining a lot of space. The number of studies on the performance and optimization of this type of energy has grown considerably. The use of concentrators can increase the performance of solar cells. This work shows a systematic review on the development of previously published works on linear Fresnel concentrators. The searches were made using Scopus and Web of Science and they show the evolution of the number of published articles on this theme and the development of concentrating photovoltaic-thermal systems through the years.

**Keywords:** Solar Energy, Solar Collector, Linear Fresnel Reflector, Photovoltaic Thermal Absorber.

### 1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento da energia solar tem se mostrado cada vez mais uma solução para a geração de energia em escala global. Problemas envolvendo mudanças climáticas no mundo têm despertado a preocupação em usar energia limpa e independente de combustíveis fósseis. Os sistemas concentrados fotovoltaicos-térmicos têm sido objeto de estudo e desenvolvimento desde o fim dos anos 1970 e início dos anos 1980 (Sharaf and Orhan, 2015a). Esses sistemas, conhecidos como sistemas CPVT, são uma combinação dos chamados fotovoltaicos concentrados (CPV) e fotovoltaicos-térmicos (PVT). O objetivo dos sistemas CPVT é aumentar a eficiência do módulo fotovoltaico por meio de concentração dos raios solares e diminuição da temperatura das células solares pela passagem de um fluido de resfriamento. A Fig. 1 apresenta o efeito de diferentes temperaturas na curva I-V de uma célula fotovoltaica. Um aumento na temperatura da célula solar acarreta em diminuição na tensão de corrente aberta da célula, o que resulta em uma menor eficiência e, consequentemente, em um menor fator de preenchimento (Singh and Ravindra, 2012).

O desenvolvimento dessa tecnologia surgiu no contexto de minimizar alguns problemas associados ao uso da energia solar, como o alto custo e a baixa eficiência elétrica das células solares. Essa eficiência pode ser ainda mais prejudicada pelas altas temperaturas atingidas em operação.

Várias são as possibilidades de configuração dos sistemas CPVT. Podem ser utilizados diferentes tipos de células solares, concentradores, fluidos de trabalho e arranjos, entre outras possibilidades. Neste trabalho, apresentam-se os resultados de alguns dos trabalhos mais relevantes acerca de sistemas CPVT, com revisão sistemática com foco no refletor linear Fresnel. Uma ilustração de sistema linear Fresnel é apresentada na Fig. 2.

Mais de 50% da energia solar incidente, deduzida a parte refletida, é convertida em calor. Isso leva a células operando a temperaturas consideravelmente acima da temperatura ambiente, o que resulta em diminuição da eficiência e danos permanentes à estrutura, em longo prazo (Chow, 2010). Sugere-se como maneira de atenuar esses efeitos o uso de um fluido para resfriamento. A energia térmica retirada pela passagem do fluido pode, inclusive, ser aproveitada após a absorção.

Os sistemas concentradores podem ser classificados, segundo Ju *et al.* (2017a), em três tipos, de acordo com sua

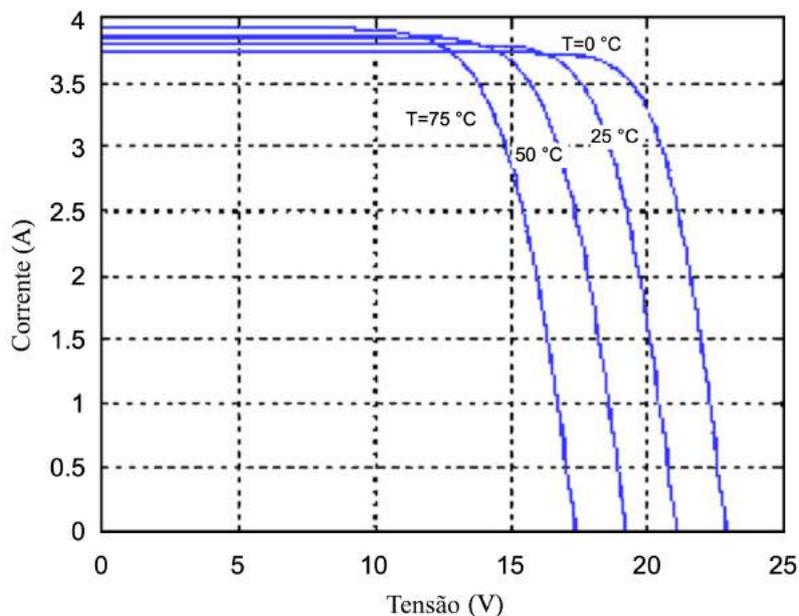


Figura 1. Efeito da temperatura na curva I-V de uma célula fotovoltaica. Adaptado de Chenni, 2007.

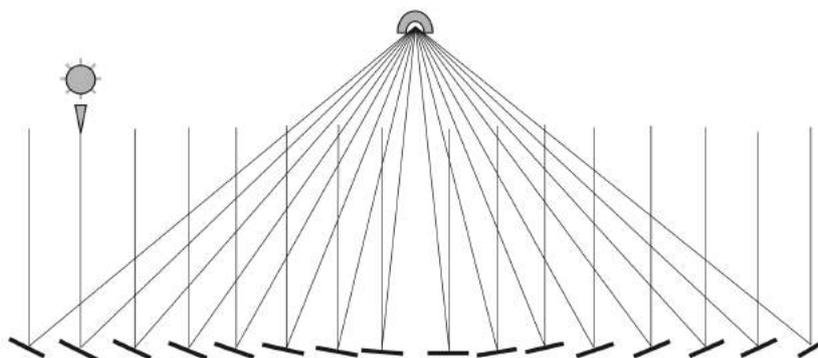


Figura 2. Ilustração de um módulo refletor linear Fresnel (Mills, 2012). Os raios solares chegam paralelos aos espelhos e são concentrados para o absorvedor.

razão de concentração solar (CR): baixa concentração ( $CR < 10$  sóis); média concentração ( $10 \leq CR \leq 100$  sóis); e alta concentração ( $CR > 100$  sóis).

## 2. METODOLOGIA

As buscas de artigos para a análise bibliográfica foram feitas com o uso de palavras-chave nas bases *Scopus* e *Web of Science*. Depois disso, realizou-se a eliminação de artigos repetidos ou não relacionados à pesquisa. Para o processamento dos dados obtidos, foram utilizados os softwares *SciMAT* e *VOSviewer*. O *SciMAT* foi utilizado para organizar os trabalhos de acordo com o ano de publicação e com os grupos de autores, além de permitir encontrar os artigos exclusivamente sobre sistemas com uso de refletor linear Fresnel e separação de artigos de acordo com as palavras-chave. Já o *VOSviewer* foi usado para auxiliar na visualização dos dados, permitindo a geração de redes e mapas de calor acerca das palavras-chave e dos grupos de autores.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Número de artigos e autores

Obteve-se como retorno um total de 376 artigos, todos relacionados a sistemas fotovoltaicos térmicos com concentração solar. A relação do número de publicações por ano é apresentada na Fig. 3. Os autores que mais contribuíram com publicações, assim como as coautorias mais frequentes, estão apresentados na Fig. 4, com a indicação dos anos de publicação. Além disso, as palavras-chave mais utilizadas nos artigos retornados estão apresentadas no mapa de calor da Fig. 5.

### 3.2 Sistemas CPVT

A Tab. 1 apresenta as principais características dos sistemas propostos nos trabalhos mais citados entre os retornados na busca, excluindo-se as revisões. Na publicação acerca de sistemas CPVT, o pioneirismo vem dos Estados Unidos, com o trabalho publicado por Winston (1975), que propõe o projeto de um coletor parabólico composto. Até a metade dos anos 2000, conforme apresentado na Fig. 3, não se observa um número significativo no número de pesquisas acerca do tema. Sharaf and Orhan (2015b) e Ju *et al.* (2017b) atribuem o fato à queda do preço do petróleo nos anos 1990, quando os sistemas CPVT começavam a ganhar força, o que diminuiu o interesse no desenvolvimento e instalação de energias renováveis, fases que representam a maior parte do investimento.

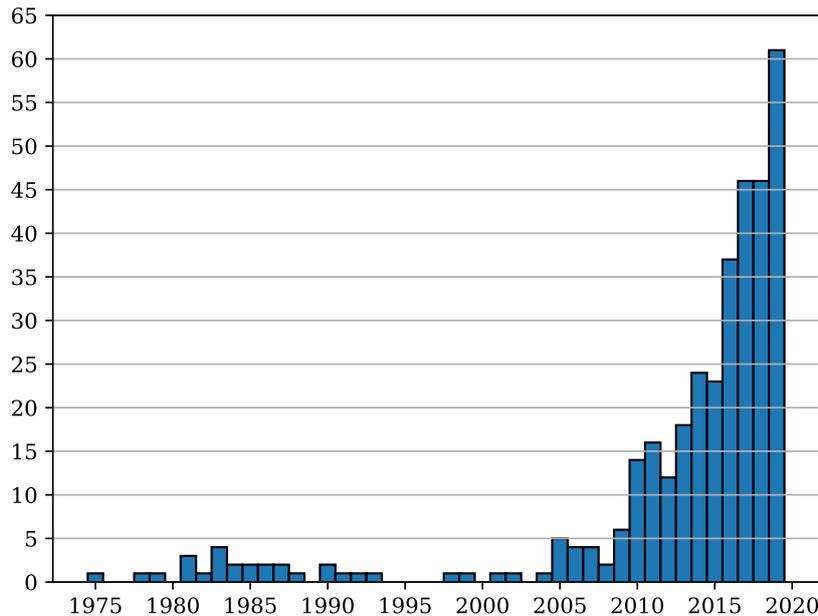


Figura 3. Número de publicações por ano retornadas na busca.

Autor	Ano	Concentrador	Rastreamento	Tipo de célula	Eficiência (%)		Caráter
					Térmica	Elétrica	
Coventry	2005	Calha parabólica	1 eixo	Silício	58	11	Experimental
Mittelman <i>et al.</i>	2007	Disco parabólico	-	InGaP/InGaAs/Ge	57	29	Teórico
Rosell <i>et al.</i>	2005	Linear Fresnel	2 eixos	Silício	60 - 65	-	Teórico/Experimental
Othman <i>et al.</i>	2005	CPC	-	-	70	1,7	Teórico/Experimental
Agrawal and Tiwari	2011	-	-	-	-	-	Teórico
Calise <i>et al.</i>	2014	Disco parabólico	2 eixos	III - V	57	19	Teórico
Garg and Adhikari	1999	CPC	-	-	-	-	Teórico
Jiang <i>et al.</i>	2010	CPC	2 eixos	Silício	-	-	Teórico
Xu and Kleinstreuer	2014	Disco parabólico	2 eixos	InGaP/InGaAs/Ge e Silício	59	11	Teórico
Brogren <i>et al.</i>	2001	CPC	-	Silício	-	33	Experimental
Kosmadakis <i>et al.</i>	2011	Disco parabólico	1 eixo	Silício	16	11	Teórico
Buonomano <i>et al.</i>	2013	-	-	-	-	-	Teórico

Tabela 1. Características dos sistemas propostos nos artigos retornados com maior número de citações.

### 3.3 Sistemas CPVT com refletor linear Fresnel

Dos artigos retornados na busca, uma análise mais profunda pode ser feita dos 21 encontrados sobre sistemas com refletor linear Fresnel, por ano de publicação de cada um.

Sharan *et al.* realizaram, em 1986, análise teórica de um sistema contendo um refletor linear Fresnel e um duto retangular contendo células solares em ambas as laterais. Considera-se que a iluminação é uniforme nas duas laterais, que o refletor possui rastreamento total, que os espaços entre as células são desprezíveis, que o vidro de cobertura está sempre em contato com as células e que a taxa de transferência de calor de cada lado do absorvedor para o resfriamento é igual. Os resultados mostram que, no início do escoamento, as potências de saída - tanto elétrica quanto térmica - aumentam rapidamente. A partir de um valor do comprimento do duto, porém, o aumento de ambas é reduzido a valores desprezíveis. Além disso, um aumento na vazão mássica de fluido refrigerante representa redução na potência térmica de saída - e consequente aumento na potência elétrica de saída.

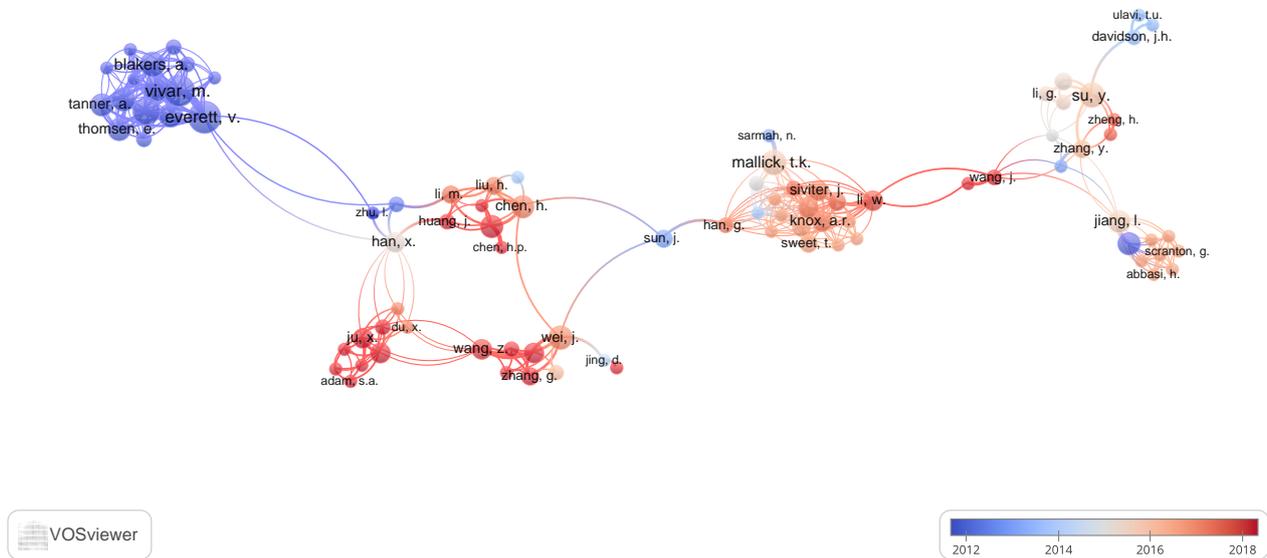


Figura 4. Rede representando a relação entre os autores que mais publicaram.

Sharan and Kandpal (1992) testaram um aparato experimental CPVT com refletor linear Fresnel. Utilizou-se água como fluido refrigerante e 44 células fotovoltaicas em série acopladas diretamente à superfície interior do absorvedor. Como resultado, mostrou-se que a eficiência de cada célula é superior à do arranjo.

O trabalho de Rosell *et al.* (2005), já nos anos 2000, apresenta os resultados de testes experimentais realizados no sistema CPVT com refletor linear Fresnel, CR igual a 11 e dois eixos de rastreamento. Todos os espelhos possuem o mesmo comprimento, mas a largura varia de acordo com a posição de cada um. Sem a geração de energia elétrica, a eficiência térmica do sistema fica entre 60% e 65%. As variações ocorrem em função da vazão de fluido refrigerante e da CR devido à posição do Sol. Os autores deixam clara a necessidade de maior estudo teórico da interação térmica entre as células solares e o absorvedor.

Walter *et al.* (2010), em uma parceria entre a Australian National University (ANU) e a empresa Chromasun Inc., propõem um sistema denominado micro-concentrador, que possui baixo custo ao consumidor como um dos objetivos, projetado especificamente para telhados em ambientes urbanos. Um sistema de rastreamento em um eixo é instalado e otimizado para garantir que a fração máxima disponível de radiação direta chegue ao receptor. As células usadas são de silício monocristalino, atingindo eficiência elétrica de 19,6% em CR igual a 20.

Everett *et al.* (2010a) estudaram o desenvolvimento do mesmo micro-concentrador a CR de até 30, com testes de projeto e confiabilidade como processos concorrentes, permitindo otimização do sistema. Além disso, fez-se uma avaliação das propriedades dos componentes do receptor, o que apresentou uma melhora na fase de projeto e na confiabilidade do produto final. A identificação antecipada dos problemas associados a essa etapa permitiu uma otimização mais rápida e confiável.

Everett *et al.* (2010b) continuam a linha de pesquisa do micro-concentrador em parceria com a empresa Chromasun na publicação seguinte, visando a eliminação de custos adicionais e complexidades associadas a concentradores lineares convencionais. O objetivo do sistema é oferecer sistemas apresentando CR de aproximadamente 15 com custos e tempo de desenvolvimento reduzidos, para instalação em telhados mirando aplicações residenciais, comerciais e industriais. Uma eficiência elétrica de 18,4% foi alcançada experimentalmente.

Vivar *et al.* (2010) basearam seu estudo na norma IEC 62108, propondo a geração de dados para que seja possível evitar falhas no desenho do concentrador fotovoltaico, otimizando-o a cada etapa transcorrida, por meio de testes simples, evitando atrasos na fase de projeto do módulo. O sistema LFR utilizado, um micro-concentrador com CR de 20 a 30, foi desenvolvido pela ANU, em parceria com a empresa Chromasun. Os testes realizados identificaram o melhor grupo de adesivos térmicos, utilizados como interface entre as células e o absorvedor, além de avaliarem performance dos materiais e compatibilidade.

Swinkels *et al.* (2011) deram continuidade ao estudo de viabilidade de Sonneveld *et al.* (2010) quanto ao uso de um sistema CPVT linear Fresnel em uma estufa. O sistema possui um filtro que concentra apenas a radiação infravermelha





Figura 7. Imagem detalhada do microconcentrador desenvolvido pela ANU em parceria com a Chromasun ao lado de um sistema PV convencional (Everett *et al.*, 2011).

700 - 1120 nm. Alguns fluidos apresentaram degradação após longos períodos de exposição a raios ultravioleta e altas temperaturas.

Seguidamente, Vivar *et al.* (2012) apresentaram resultados de testes realizados no microconcentrador Chromasun instalado nas dependências da Escola de Engenharia da ANU durante um dia inteiro. Os resultados apresentaram que a eficiência combinada do sistema pode ultrapassar 70%. O sistema permite configurações em série ou em paralelo. Em determinados momentos do dia, a temperatura do fluido foi resfriada a aproximadamente 30 °C, resultando em maior eficiência elétrica, porém com menor temperatura de saída. Em sistemas comerciais e em condições de operação reais, deve-se encontrar um ponto ótimo de acordo com a relação entre as demandas de eletricidade e água quente.

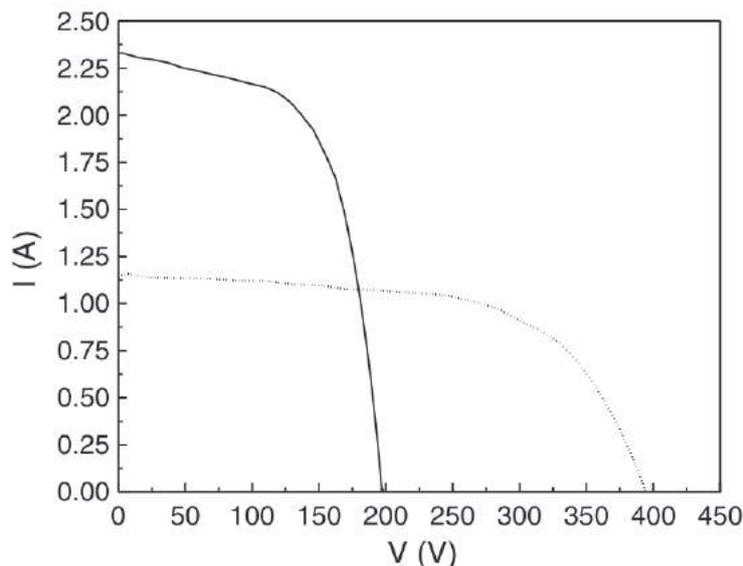


Figura 8. Curvas I-V para ligações em série e em paralelo obtidas no trabalho de Vivar *et al.* (2012).

Um sistema CPVT-LFR composto por duas partes simétricas foi apresentado por Hu *et al.* (2013). Nesse projeto, utiliza-se um divisor óptico, que separa a radiação solar concentrada em duas partes: uma para a geração de energia fotovoltaica e a outra para uso térmico. Sendo o receptor térmico separado das células solares, consegue-se aquecer o fluido de trabalho a temperaturas mais altas sem comprometer o desempenho das células solares. Um revestimento otimizado de  $\text{Nb}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  é proposto, capaz de rejeitar aproximadamente 71% da radiação indesejada, compreendida no intervalo  $1,1 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 3 \mu\text{m}$ , para o receptor térmico. Concluiu-se que, para um sistema com 30 espelhos, a geração fotovoltaica teórica é de aproximadamente 12%, e pelo menos 30% da energia solar pode ser simultaneamente aproveitada

e convertida em calor.

Crisostomo *et al.* (2013), analogamente, utilizaram tecnologia de divisão ótica, separando a radiação solar em uma parte para uso da célula fotovoltaica e outra para aumento da temperatura do fluido, para propor uma análise numérica do concentrador. Utiliza-se o *software* Zemax, de rastreamento de raios, para modelar a geometria do concentrador em diferentes ângulos de incidência, a fim de se prever a performance ótica. São analisados diferentes tipos de células fotovoltaicas - Si, GaAs e GaInP/GaAs - utilizando CR de 15 e 20. Uma das conclusões mais importantes do trabalho indica que o sistema híbrido CPVT proposto apresenta eficiência elétrica entre 20 e 51% maior que um sistema fotovoltaico convencional. Além disso, afirma-se que a célula de GaInP/GaAs é a que teoricamente consegue apresentar maior aumento em eficiência elétrica no sistema linear Fresnel.

Liu *et al.* (2014) propuseram um sistema CPVT híbrido com divisão ótica e refletor linear Fresnel com rastreamento em dois eixos e presença de um refletor secundário para o absorvedor térmico. Os resultados apresentados mostram que a conversão de energia do sistema CPVT é maior que a de sistemas CPV sob as mesmas condições.

Chemisana *et al.* (2016), apresentando dados referentes ao consumo energético de prédios na União Europeia, projetaram e construíram um sistema CPVT com refletor linear Fresnel e rastreamento axial para instalação em fachadas de prédios, realizando testes a fim de analisar a performance. Os resultados experimentais apresentaram eficiência ótica em torno de 51%, de acordo com os resultados obtidos das simulações. O sistema CPVT apresentou performance superior ao sistema PVT na produção tanto de energia elétrica quanto de energia térmica. A energia elétrica produzida foi 4,5 a 4,7 vezes maior, enquanto a energia térmica superou o sistema convencional em 1,9 a 2,8 vezes, a depender das condições climáticas dos testes. O sistema de rastreamento foi analisado em condições variáveis de irradiância, para se determinar sua sensibilidade a essas alterações, e os resultados mostraram resposta adequada, já que não houve perda significativa de energia elétrica devido a falhas no sistema de rastreamento.

Gomaa *et al.* (2018) apresentaram uma análise da performance de um sistema híbrido CPVT-LFR. Foi desenvolvido um modelo matemático e realizaram-se simulações do sistema composto por espelhos planos de diferentes larguras em diferentes ângulos de inclinação. Analisaram-se os efeitos da distância focal no parâmetro CR, da largura do coletor e do calor recebido pelo fluido de trabalho nos resultados. Para distâncias focais específicas, a largura dos espelhos diminuiu conforme aumentou-se o número de espelhos, enquanto um aumento na distância focal resultou em maior CR. Para um número específico de espelhos, houve um aumento no valor de CR com aumento da distância focal. Além disso, aumentar o número de espelhos resultou em redução na sua largura e nos ângulos de inclinação, além de aumento no valor de CR. Os resultados apresentaram que o sistema deveria ser projetado com distância focal entre 1 e 2,5 m. Finalmente, apresentam-se os valores de 18%, 62% e 80% encontrados nas eficiências elétrica, térmica e combinada, respectivamente, destacando-se como vantagem a boa performance da tecnologia a custo relativamente baixo.

#### 4. CONCLUSÕES

O uso de energia solar para geração de energia elétrica e térmica tem sido uma opção atraente para os setores de pesquisa e comércio desde o início dos estudos, nos anos 1970. A combinação entre os sistemas CPV e PVT tem mostrado desempenhos cada vez melhores de eficiências. Mesmo que os sistemas tipo calha parabólica possuam maior atenção hoje em dia, os sistemas CPVT-LFR apresentam, entre suas vantagens, menor custo de construção e menor volume. No entanto, a eficiência apresentada ainda é baixa (Sharaf and Orhan, 2015a).

A parceria entre universidades e empresas privadas, como no caso da Universidade Nacional da Austrália (ANU) e da empresa Chromasun Inc., apresenta a possibilidade de comercialização de concentradores desde aplicações industriais até uso doméstico.

Notou-se, também, o aumento da eficiência quando utilizam-se sistemas de rastreamento e quando são otimizados os sistemas, de modo a favorecer as trocas de calor entre as células fotovoltaicas e o fluido de trabalho. O desafio, nessa parte, está na escolha adequada de materiais, já que a interface entre as células e o duto de passagem do fluido exige isolamento elétrico.

Por último, foi possível notar que o estudo de sistemas CPVT-LFR, mesmo apresentando pouca quantidade em relação aos estudos de todos os tipos de sistemas CPVT, tem grande influência de um grupo bem definido de autores. Os avanços realizados para esse tipo de sistema nos últimos anos são bastante significativos e devem contribuir para a iminente popularização dos sistemas linear Fresnel.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Agrawal, S. and Tiwari, G., 2011. "Energy and exergy analysis of hybrid micro-channel photovoltaic thermal module". *Solar Energy*, Vol. 85, No. 2, pp. 356–370. doi:10.1016/j.solener.2010.11.013. URL <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.11.013>.
- Ahmad, N., Ijro, T., Yamada, N., Kawaguchi, T., Maemura, T. and Ohashi, H., 2012. "Optical design of wavelength selective CPVT system with 3d/2d hybrid concentration". In R. Winston and J.M. Gordon, eds., *Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration IX*. SPIE. doi:10.1117/12.929395. URL

- <https://doi.org/10.1117/12.929395>.
- Brogren, M., Nostell, P. and Karlsson, B., 2001. "Optical efficiency of a PV–thermal hybrid CPC module for high latitudes". *Solar Energy*, Vol. 69, pp. 173–185. doi:10.1016/s0038-092x(01)00066-4. URL [https://doi.org/10.1016/s0038-092x\(01\)00066-4](https://doi.org/10.1016/s0038-092x(01)00066-4).
- Buonomano, A., Calise, F. and Palombo, A., 2013. "Solar heating and cooling systems by CPVT and ET solar collectors: A novel transient simulation model". *Applied Energy*, Vol. 103, pp. 588–606. doi:10.1016/j.apenergy.2012.10.023. URL <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.023>.
- Calise, F., d'Accadia, M.D. and Piacentino, A., 2014. "A novel solar trigeneration system integrating PVT (photovoltaic/thermal collectors) and SW (seawater) desalination: Dynamic simulation and economic assessment". *Energy*, Vol. 67, pp. 129–148. doi:10.1016/j.energy.2013.12.060. URL <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.060>.
- Chemisana, D., Rosell, J., Riverola, A. and Lamnatou, C., 2016. "Experimental performance of a fresnel-transmission PVT concentrator for building-façade integration". *Renewable Energy*, Vol. 85, pp. 564–572. doi:10.1016/j.renene.2015.07.009. URL <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.009>.
- Chenni, R., Makhlof, M., Kerbache, T. and Bouzid, A., 2007. "A detailed modeling method for photovoltaic cells". *Energy*, Vol. 32, No. 9, pp. 1724–1730. doi:10.1016/j.energy.2006.12.006. URL <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.12.006>.
- Chow, T., 2010. "A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology". *Applied Energy*, Vol. 87, No. 2, pp. 365–379. doi:10.1016/j.apenergy.2009.06.037. URL <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.037>.
- Coventry, J.S., 2005. "Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector". *Solar Energy*, Vol. 78, No. 2, pp. 211–222. doi:10.1016/j.solener.2004.03.014. URL <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.03.014>.
- Crisostomo, F., Taylor, R.A., Mojiri, A., Hawkes, E.R., Surjadi, D. and Rosengarten, G., 2013. "Beam splitting system for the development of a concentrating linear fresnel solar hybrid PV/t collector". In *Volume 1: Heat Transfer in Energy Systems Thermophysical Properties Theory and Fundamental Research in Heat Transfer*. American Society of Mechanical Engineers. doi:10.1115/ht2013-17221. URL <https://doi.org/10.1115/ht2013-17221>.
- Everett, V., Greaves, M., Harvey, J., Lievre, P.L., Surve, S., Tanner, A., Thomsen, E., Vivar, M., Walter, D., Dimroth, F., Kurtz, S., Sala, G. and Bett, A.W., 2011. "Evaluation of performance and reliability for components of a linear hybrid micro-concentrator system". AIP. doi:10.1063/1.3658352. URL <https://doi.org/10.1063/1.3658352>.
- Everett, V., Walter, D., Harvey, J., Vivar, M., Surve, S., Blakers, A., Le Lievre, P., Greaves, M. and Tanner, A., 2010a. "A closed loop tracking system for a linear fresnel hybrid pv/thermal microconcentrator system". *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Vol. 6-10 September 2010, pp. Spain; 1063–1065. doi:10.4229/25THEUPVSEC2010-IDV.5.66. URL <http://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?paper=6508>.
- Everett, V., Walter, D., Harvey, J., Vivar, M., Surve, S., Blakers, A., Le Lievre, P., Greaves, M. and Tanner, A., 2010b. "A linear fresnel hybrid pv/thermal micro-concentrator system for roof-top integration". *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Vol. 6-10 September 2010, pp. Spain; 3937–3941. doi:10.4229/25THEUPVSEC2010-4DO.11.3. URL <http://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?paper=6498>.
- Everett, V., Wu, Y., Resch, A., Ebert, M., Vivar, M., Thomsen, E., Harvey, J., Scott, P., Greaves, M., Tanner, A. and Blakers, A., 2012. "Towards an innovative spectral-splitting hybrid PV-t micro-concentrator". AIP. doi:10.1063/1.4753875. URL <https://doi.org/10.1063/1.4753875>.
- Garg, H.P. and Adhikari, R.S., 1999. "Performance analysis of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/t) collector with integrated CPC troughs". *International Journal of Energy Research*, Vol. 23, No. 15, pp. 1295–1304. doi:10.1002/(sici)1099-114x(199912)23:15<1295::aid-er553>3.0.co;2-t. URL [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-114x\(199912\)23:15<1295::aid-er553>3.0.co;2-t](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-114x(199912)23:15<1295::aid-er553>3.0.co;2-t).
- Gomaa, M., Mustafa, R., Rezk, H., Al-Dhaifallah, M. and Al-Salaymeh, A., 2018. "Sizing methodology of a multi-mirror solar concentrated hybrid PV/thermal system". *Energies*, Vol. 11, No. 12, p. 3276. doi:10.3390/en11123276. URL <https://doi.org/10.3390/en11123276>.
- Hu, P., Zhang, Q., Liu, Y., Sheng, C., Cheng, X. and Chen, Z., 2013. "Optical analysis of a hybrid solar concentrating photovoltaic/thermal (CPV/t) system with beam splitting technique". *Science China Technological Sciences*, Vol. 56, No. 6, pp. 1387–1394. doi:10.1007/s11431-013-5209-2. URL <https://doi.org/10.1007/s11431-013-5209-2>.
- Jiang, S., Hu, P., Mo, S. and Chen, Z., 2010. "Optical modeling for a two-stage parabolic trough concentrating photovoltaic/thermal system using spectral beam splitting technology". *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 94, No. 10, pp. 1686–1696. doi:10.1016/j.solmat.2010.05.029. URL <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.05.029>.
- Ju, X., Xu, C., Han, X., Du, X., Wei, G. and Yang, Y., 2017a. "A review of the concentrated photovoltaic/thermal (CPVT) hybrid solar systems based on the spectral beam splitting technology". *Applied Energy*, Vol. 187, pp. 534–563. doi:10.1016/j.apenergy.2016.11.087. URL <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.087>.

- Ju, X., Xu, C., Liao, Z., Du, X., Wei, G., Wang, Z. and Yang, Y., 2017b. “A review of concentrated photovoltaic-thermal (CPVT) hybrid solar systems with waste heat recovery (WHR)”. *Science Bulletin*, Vol. 62, No. 20, pp. 1388–1426. doi:10.1016/j.scib.2017.10.002. URL <https://doi.org/10.1016/j.scib.2017.10.002>.
- Kosmadakis, G., Manolakos, D. and Papadakis, G., 2011. “Simulation and economic analysis of a CPV/thermal system coupled with an organic rankine cycle for increased power generation”. *Solar Energy*, Vol. 85, No. 2, pp. 308–324. doi:10.1016/j.solener.2010.11.019. URL <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.11.019>.
- Liu, Y., Hu, P., Zhang, Q. and Chen, Z., 2014. “Thermodynamic and optical analysis for a CPV/t hybrid system with beam splitter and fully tracked linear fresnel reflector concentrator utilizing sloped panels”. *Solar Energy*, Vol. 103, pp. 191–199. doi:10.1016/j.solener.2014.01.047. URL <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.047>.
- Mills, D., 2012. “Linear fresnel reflector (LFR) technology”. In *Concentrating Solar Power Technology*, Elsevier, pp. 153–196. doi:10.1533/9780857096173.2.153. URL <https://doi.org/10.1533/9780857096173.2.153>.
- Mittelman, G., Kribus, A. and Dayan, A., 2007. “Solar cooling with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, No. 9, pp. 2481–2490. doi:10.1016/j.enconman.2007.04.004. URL <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.04.004>.
- Othman, M.Y.H., Yatim, B., Sopian, K. and Bakar, M.N.A., 2005. “Performance analysis of a double-pass photovoltaic/thermal (PV/t) solar collector with CPC and fins”. *Renewable Energy*, Vol. 30, No. 13, pp. 2005–2017. doi:10.1016/j.renene.2004.10.007. URL <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.10.007>.
- Rosell, J., Vallverdú, X., Lechón, M. and Ibáñez, M., 2005. “Design and simulation of a low concentrating photovoltaic/thermal system”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 46, No. 18-19, pp. 3034–3046. doi:10.1016/j.enconman.2005.01.012. URL <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.01.012>.
- Sharaf, O.Z. and Orhan, M.F., 2015a. “Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part I – fundamentals, design considerations and current technologies”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 50, pp. 1500–1565. doi:10.1016/j.rser.2015.05.036. URL <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.036>.
- Sharaf, O.Z. and Orhan, M.F., 2015b. “Concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: Part II – implemented systems, performance assessment, and future directions”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 50, pp. 1566–1633. doi:10.1016/j.rser.2014.07.215. URL <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.215>.
- Sharan, S. and Kandpal, T., 1992. “Testing of a prototype combined photovoltaic-thermal linear fresnel concentrator-receiver system”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 33, No. 1, pp. 37–39. doi:10.1016/0196-8904(92)90144-1. URL [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(92\)90144-1](https://doi.org/10.1016/0196-8904(92)90144-1).
- Sharan, S., Mathur, S. and Kandpal, T., 1986. “Analysis of an actively cooled photovoltaic-thermal solar concentrator receiver system using a fin-type absorber”. *Solar & Wind Technology*, Vol. 3, No. 4, pp. 281–285. doi:10.1016/0741-983x(86)90007-x. URL [https://doi.org/10.1016/0741-983x\(86\)90007-x](https://doi.org/10.1016/0741-983x(86)90007-x).
- Singh, P. and Ravindra, N., 2012. “Temperature dependence of solar cell performance—an analysis”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 101, pp. 36 – 45. ISSN 0927-0248. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.02.019>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024812000931>.
- Sonneveld, P., Swinkels, G., van Tuijl, B., Janssen, H. and Bot, G., 2010. “Greenhouse with a CPV system based on NIR reflecting lamellae”. *Acta Horticulturae*, , No. 927, pp. 43–50. doi:10.17660/actahortic.2012.927.3. URL <https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.927.3>.
- Swinkels, G., Sonneveld, P., Tuijl, B. and Janssen, H., 2011. “A spectral selective lamellae concentrator system as bi-cpv/t system”. *26th European Photovoltaic Solar Energy Conference*. doi:10.4229/26THEUPVSEC2011-4AV.3.42. URL <https://doi.org/10.4229/26THEUPVSEC2011-4AV.3.42>.
- Vivar, M., Everett, V., Fuentes, M., Blakers, A., Tanner, A., Lievre, P.L. and Greaves, M., 2012. “Initial field performance of a hybrid CPV-t microconcentrator system”. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 21, No. 8, pp. 1659–1671. doi:10.1002/pip.2229. URL <https://doi.org/10.1002/pip.2229>.
- Vivar, M., Scheppingen, R.V., Clarke, M., Everett, V., Walter, D., Harvey, J., Surve, S., Muric-Nesic, J. and Blakers, A., 2010. “Integrating the design and reliability assessment of a hybrid pv-thermal microconcentrator system”. In *2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. IEEE. doi:10.1109/pvsc.2010.5614486. URL <https://doi.org/10.1109/pvsc.2010.5614486>.
- Walter, D., Everett, V., Blakers, A., Vivar, M., Harvey, J., Muric-Nesic, J., Ratcliff, T., Surve, S., Van, R., Lievre, P.L., Greaves, M. and Tanner, A., 2010. “A 20-sun hybrid PV-thermal linear micro-concentrator system for urban rooftop applications”. In *2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. IEEE. doi:10.1109/pvsc.2010.5617182. URL <https://doi.org/10.1109/pvsc.2010.5617182>.
- Winston, R., 1975. “The design and performance of compound parabolic solar concentrators for thermal and photovoltaic applications”. In *Electro-optical Systems Design Conference and International Laser Exposition*. pp. 84–91.
- Xu, Z. and Kleinstreuer, C., 2014. “Concentration photovoltaic-thermal energy co-generation system using nanofluids for cooling and heating”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 87, pp. 504–512. doi:10.1016/j.enconman.2014.07.047. URL <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.047>.

## **6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES**

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.