

Feasibility study for installing thermosolar electric generators in the city of Garanhuns, Pernambuco

Luís Roberto Cavalcanti da Silva*, Ricardo Brauer Vigoderis**

*Mestrando em Ciências Ambientais – UFRPE/UFPE. Email: luis.r.c.silva@gmail.com

**Doutor em Engenharia Agrícola – UFRPE/UFPE. Email: ricardo.vigoderis@ufape.edu.br

Received 20 October 2021; accepted 30 December 2021

Abstract

The growing demand for clean and renewable energy sources has increased the frequency of research for the development of new applications aimed at already known energy sources, such as biomass, biogas and wind energy. In the case of solar energy, there is a greater and more consolidated use of photovoltaic panels, which need more improved technologies. However, this same source of energy can be used in other ways, such as through thermoelectric plants, which use the thermal energy from irradiation in a concentrated manner and, therefore, generate vapors that activate the electrical generators. In this way, these plants can be implemented in different regions of the Earth that present an abundant level of insolation and that, therefore, can increase more potential in the electrical transmission network. Although promising, thermosolar energy production may not be feasible everywhere or everywhere. Better studies must be carried out to identify the technical and economic feasibility for the implantation of thermosolar plants. In this context, the municipality of Garanhuns has a lot of geomorphological irregularity, with altitudes ranging from 540 to 1,010 meters, which disadvantages and disfavors the direct incidence of solar radiation, due to the slopes, which affect the radiation angle, or to the shading, which reduces the daily heat stroke. Thus, these factors cause the direct solar irradiation in the Garanhuns region to present at most 4.0 kWh/m²/d, far from the ideal value, around 5.5 kWh/m²/d. With that, the installation of thermosolar plants in Garanhuns would only be viable with investments in earthworks, what makes projects more expensive.

Keywords: Clean energy, solar energy, alternative energy, heliothermal plants.

Estudo da viabilidade para instalação de eletrogeradores termossolares no município de Garanhuns, Pernambuco

Resumo

A crescente demanda por fontes de energia renováveis e limpas fez aumentar a frequência de pesquisas para o desenvolvimento de novas aplicações voltadas às fontes energéticas já conhecidas, como a biomassa, o biogás e a energia eólica. No caso da energia solar há uma utilização maior e mais consolidada das placas fotovoltaicas, que necessitam de tecnologias mais aprimoradas. Porém, essa mesma fonte de energia pode ser aproveitada de outras formas, como através de usinas termelétricas, que utilizam a energia térmica da irradiação de forma concentrada e, com isso, geram vapores que ativam os geradores elétricos. Dessa forma, essas usinas podem ser implementadas em diversas regiões da Terra que apresentem um nível de insolação abundante e que, assim, possam incrementar mais potencial na rede de transmissão elétrica. Apesar de promissora, a produção de energia termossolar pode não ser viável em todos os lugares. Melhores estudos devem ser realizados para identificar a viabilidade técnica e econômica para a implantação de plantas termossolares. Nesse contexto, o município de Garanhuns apresenta muita irregularidade geomorfológica, com altitudes que vão de 540 a 1.010 metros, desfavorecendo a incidência direta da irradiação solar, devido aos declives que prejudicam o ângulo da irradiação, ou ao sombreamento, que reduz a insolação diária. Esses fatores fazem com que a irradiação solar direta na região de Garanhuns se apresente, no máximo, em 4,0 kWh/m²/d, bem distante do valor ideal, em torno de 5,5 kWh/m²/d. Com isso, a instalação de plantas termossolares em Garanhuns só seria viável com investimentos em terraplanagem, o que encarece os projetos.

Palavras-chave: Energia limpa, energia solar, energia alternativa, usinas heliotérmicas.

1. Introdução

A energia emitida pelo Sol tem um grande potencial para suprir a necessidade iminente de fontes limpas de energia na atualidade. Essa fonte

energética se destaca pela sua flexibilidade de aplicações, podendo ser utilizada em projetos que requerem fontes de calor ou para a produção de eletricidade, em pequena ou em larga escala (Cerqueira et al., 2019).

A geração de eletricidade com o aproveitamento da energia solar pode ser feita de diversas formas. Uma delas é através do efeito fotovoltaico (Figura 1), relatado inicialmente em 1839 por Edmund Becquerel, quando observou a produção de corrente elétrica por eletrodos de platina revestidos por prata em solução eletrolítica, sob o efeito da luz (Voudoukis, 2018). Esse efeito é causado pela absorção dos fótons (partículas que compõem a luz solar) por materiais semicondutores, geralmente silício (Si), e isso causa uma excitação dos elétrons desses materiais. Dessa forma, as placas fotovoltaicas (Figura 2) são constituídas basicamente por uma camada de Si tipo P, dopado positivamente e, com isso, recebe elétrons, e outra do tipo N, dopado negativamente para perder elétrons, com uma fina lâmina metálica entre as duas. Essas placas, ao receberem incidência direta da luz solar, os elétrons se moverão entre elas e produzirão energia elétrica (Hegedus e Luque, 2011).

Outra forma de utilizar a irradiação solar para gerar eletricidade e que vem recebendo bastante atenção nos últimos anos é o sistema de captação termossolar que, através de placas refletoras, concentram a energia térmica dos raios solares em um único ponto e, com isso, ocorre o aquecimento intenso de fluidos térmicos, utilizados para produzir vapor d'água em altas pressões e gerar energia mecânica para acionar um eletrogerador (Brito et al., 2019). Nesse contexto, a geração elétrica termossolar, coloca-se como uma opção muito promissora, pois utiliza um recurso livre, abundante e inesgotável (Baharoon et al., 2014; Islam et al., 2018; Weinstein et al., 2015).

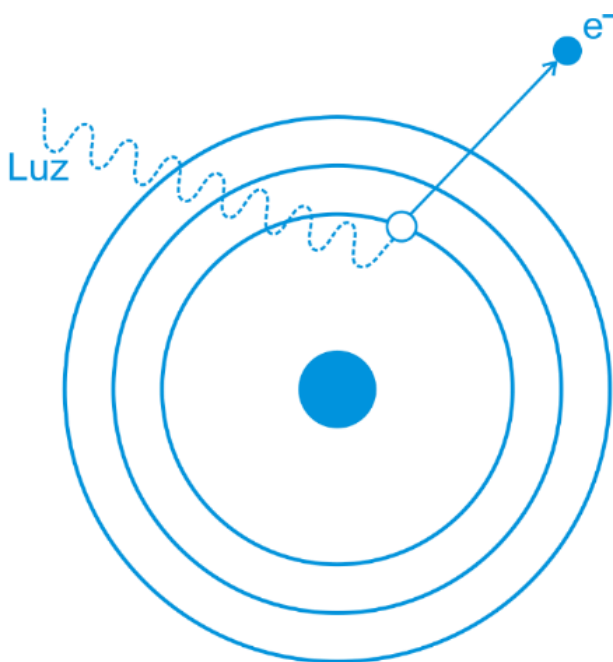


Figura 1 - Representação do efeito fotovoltaico. Fonte: adaptado de Voudoukis (2018).

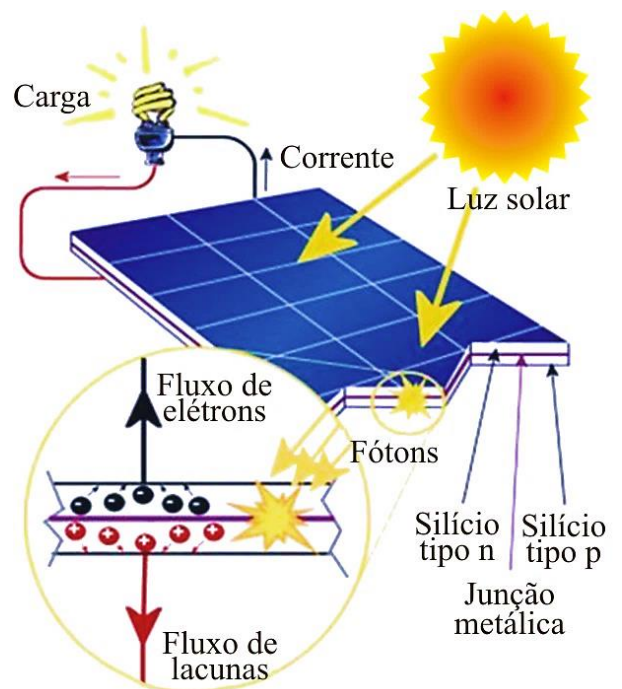


Figura 2 - Diagrama de um painel solar fotovoltaico. Fonte: Voudoukis (2018).

Além de ser aproveitada para gerar eletricidade, a energia termossolar pode, ainda, ser aplicada na indústria, nos setores de cimento e produção de etanol, para o aquecimento das águas residenciais, para secar produtos agrícolas, entre várias outras aplicações, que a torna uma das fontes energéticas mais versáteis que existem (Brito et al., 2019).

A lógica do funcionamento de um concentrador solar é exatamente concentrar a energia térmica dos raios solares em um único ponto e, com isso, amplificar a irradiação para obter temperaturas muito elevadas, acima de 150 °C (Pigozzo Filho et al., 2018). Contudo, as temperaturas podem atingir 400 °C, no caso da utilização de óleos como fluidos térmicos, ou a 600 °C, com a utilização de sais fundidos (Bellos et al., 2018).

Os sistemas geradores termossolar, ou sistemas de energia solar concentrada, podem ser implementados em quatro modelos principais, são eles, os concentradores solar: cilindro-parabólico, linear Fresnel, disco parabólico e de torre central. Assim, dependendo da situação e ambiente de instalação, podem apresentar vantagens e desvantagens uns em relação aos outros, tais como a capacidade de geração elétrica contínua e as maiores temperaturas captadas das torres centrais e a versatilidade dos concentradores de discos parabólicos, enquanto, por outro lado, as torres necessitam de muito espaço físico para serem montadas e os discos necessitam de um motor auxiliar para gerar eletricidade. (García Marín e Espejo Marín, 2010; Mendes e Horta, 2010).

Concentrador Cilindro-Parabólico

Essa categoria de concentradores funciona conforme a geometria da calha refletora parabólica e o posicionamento dos coletores térmicos em relação a elas. Dessa forma, os raios solares são refletidos pelos espelhos, concentrando a energia em uma linha focal pequena, como mostra a Figura 3 e, com isso, multiplicando em cerca de 30 a 80 vezes, a intensidade da irradiação e produzindo energia térmica em elevadas temperaturas (Mendes e Horta, 2010; Sridhar et al., 2018).

Esse sistema tem sido estudado amplamente em conjunto com outras aplicações voltadas para o aproveitamento da energia solar, como é o caso da solução proposta por Soltani et al. (2018), a qual consiste na integração de três sistemas eletrogeradores: a células fotovoltaicas, o concentrador solar cilindro-parabólico e os módulos termelétricos. Nesse sentido, Habchi et al. (2021), modelaram um sistema híbrido, formado por um concentrador cilindro-parabólico e um gerador termelétrico cilíndrico e, de acordo com suas pesquisas, conseguiram obter energia térmica e elétrica simultaneamente.

Para serem mais eficiente, alguns sistemas de calhas parabólicas recorrem a sensores de GPS e, dessa forma, rastreiam o posicionamento do Sol para seguir seu movimento aparente e assegurar que os raios solares sempre atinjam a calha reflexiva de forma perpendicular (Yalçdnkaya, 2020).

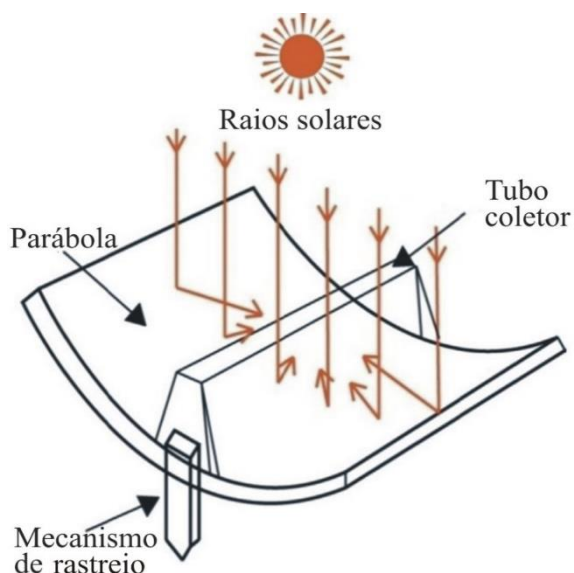


Figura 3 - Representação esquemática de um concentrador solar cilindro-parabólico. Fonte: Joardder (2017).

Concentrador Linear Fresnel

Os concentradores de reflexão linear de Fresnel (RLF) podem ser utilizados em sistemas geradores de eletricidade, utilizando uma série de concentradores solares planos, revestidos com

material reflexivo para, assim, expandir a densidade da radiação captada de maneira uniforme e direcional para os coletores ou absorvedores de calor (Wang et al., 2019).

No entanto, Kiyae et al. (2021), aponta para a utilização do sistema de concentradores solar com lentes lineares Fresnel, como amplificador de irradiação direta, para geração de energia elétrica em placas fotovoltaicas. Segundo eles, o principal problema desse método é o superaquecimento das placas devido ao aumento considerável da temperatura, porém, afirmam que isso pode ser atenuado com a utilização de arranjos diferentes das lentes para que a difração da luz possa ser melhorada.

As elevadas temperaturas que resultam da concentração solar nos sistemas RLF são captadas por um tubo linear, com um fluido de transferência de calor em seu interior (Figura 4), de forma semelhante ao concentrador cilindro-parabólico (Souza et al., 2021; Wang et al., 2019). Contudo, deve-se realizar melhores estudos, considerando as especificações geométricas para aperfeiçoar as dimensões do sistema em conformidade com os requisitos de concentração solar, com a adequação do terreno e com a variação climática anual para, dessa forma, se obter um melhor aproveitamento de seu potencial, (Gea et al., 2010).

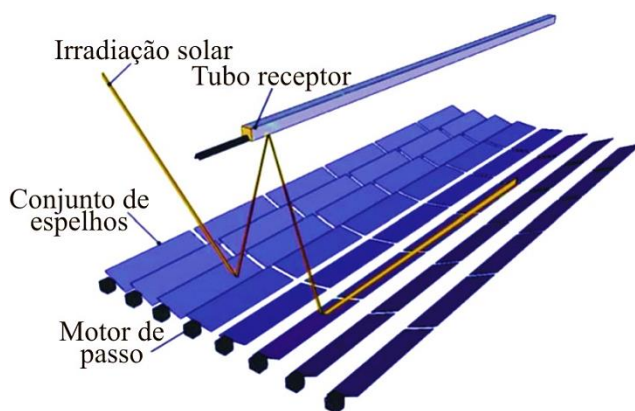


Figura 4 - Representação esquemática de um concentrador RLF. Fonte: Lin et al. (2013)

Concentrador Solar Disco Parabólico

Geralmente, a aplicação para os discos parabólicos de concentração solar com o intuito de geração de eletricidade utiliza um gerador elétrico conectado a um motor Stirling (Figura 5), que funciona à combustão externa (Beltrán-Chacón et al., 2012). Esse motor pode ser acionado com qualquer fonte externa de calor e, dessa forma, estar entre os mais eficientes sistemas de conversão de energia térmica em energia mecânica que existem, sendo apontado como uma excelente alternativa para o aproveitamento da energia solar concentrada, usado, em especial, para geração de eletricidade (Zare e

Tavakolpour-Saleh, 2016; Tavakolpour et al., 2008; Yousefzadeh e Tavakolpour-Saleh, 2021).

Porém, esse sistema pode ser utilizado para outras aplicações, como aponta Abubakkar et al. (2021), ao estudar meios de utilização dos concentradores solar de disco parabólico para dessalinização de águas do mar através da destilação, utilizando materiais simples, como recipiente de vidro, laminados metálicos reutilizados e garrafas PET. Em seu trabalho, os autores enfatizam que a água gerada após o processo tem uma redução na salinidade bastante significativa, podendo ser utilizada para uso doméstico e rural.

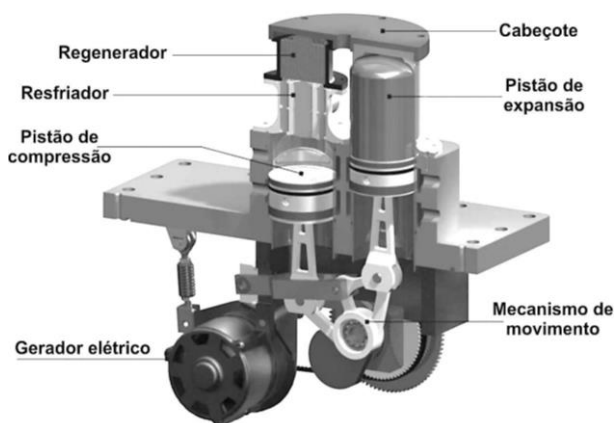


Figura 5 - Característica de um motor Stirling. Fonte: García e Prieto (2012).

Para a construção dos discos parabólicos, podem ser utilizados diversos tipos de materiais e em diversas dimensões, conforme os requisitos e a forma que serão aplicados, como em fogões solares, ou em sistemas de usinas termelétricas de concentração solar (Cerqueira et al., 2019). O funcionamento desse sistema é mostrado na Figura 6.

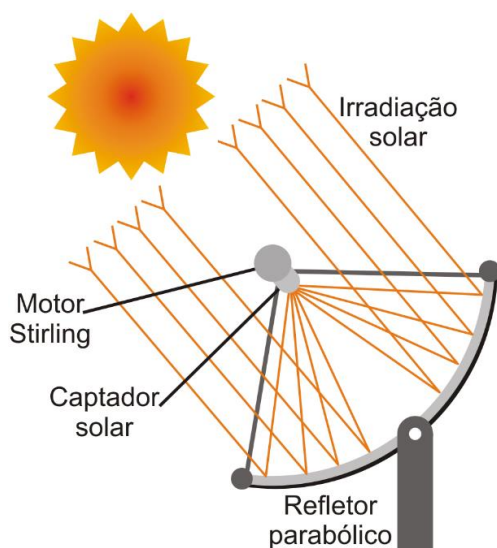


Figura 6 - Funcionamento do gerador solar termelétrico com disco parabólico e motor Stirling.

Fonte: adaptado de Arora et al. (2016) e Ziland e Eray (2017).

Nesse sentido, para gerar energia elétrica, é aproveitada a propriedade óptica dos discos parabólicos de focar a incidência da irradiação solar em um único ponto em que está localizado o coletor térmico, que aciona o motor Stirling devido a elevada temperatura e, por fim, se conecta a um gerador elétrico que, conforme as dimensões, pode apresentar potenciais variáveis (García Marín e Espejo Marín, 2010; Hernández Reyes et al., 2017; Reyes et al., 2020).

Concentrador Solar de Torre Central

Como a irradiação solar na Terra não está disponível 24 horas por dia, o aproveitamento dessa fonte de energia fica limitado aos períodos onde o Sol fica visível e, mesmo assim, em caso de dias não nublados. Contudo, o sistema de concentradores solar de torre central pode reduzir esse problema, pois foi desenvolvido para armazenar a energia térmica absorvida por até 15 horas e, com isso, a geração de energia elétrica é contínua, inclusive durante a noite ou em dias nublados (García Marín e Espejo Marín, 2010).

Além de ser utilizado amplamente como plantas de geração elétrica, esse sistema pode ser aplicado em outros fins, como é mostrado por Khanmohammadi et al. (2021) e Li et al. (2020), em seus trabalhos, nos quais estudam e propõem sistemas termossolares de torre central para gerar eletricidade e aproveitar as temperaturas residuais para a produção de água destilada, através da dessalinização de águas do mar.

O sistema termossolar de torrecentral (Figura 7) funciona com os seguintes elementos principais: os heliostatos (placas refletoras móveis), a torre central, o sistema receptor ou coletor térmico e o sistema de bombeamento e refrigeração (García Marín e Espejo Marín, 2010; Piña-Ortiz et al., 2018).

Para a implantação desse sistema é requisitado uma área de grandes dimensões, principalmente para acomodar os heliostatos, que devem acompanhar o movimento aparente do Sol e, com isso, garantir a constante perpendicularidade da irradiação refletida para o coletor solar, localizado na parte mais elevada da torre, podendo ampliar em cerca de 600 vezes a irradiação solar (García Marín e Espejo Marín, 2010).

Recebendo a irradiação concentrada dos heliostatos, o coletor térmico aquece o fluido em até 1.000 °C, geralmente sais fundidos, bombeados para reservatórios contendo água e gera vapores em alta pressão, esses vapores acionam a rotação das turbinas e dos geradores elétricos (Benitez et al., 2015; Piña-Ortiz et al., 2018).

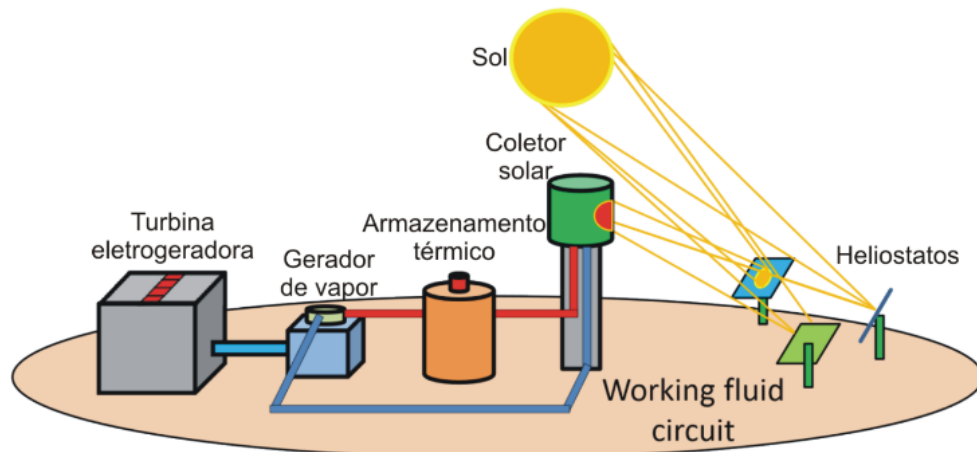


Figura 7 - Sistema termossolar de torre solar central. Fonte: Cruz et al. (2017).

Observa-se aqui a versatilidade de aplicações para o aproveitamento da energia solar, tanto para conversão direta em eletricidade quanto para a conversão em energia térmica, através de diversas tecnologias de concentradores solares. Sabendo disso, há uma necessidade cada vez maior de desenvolver ou aprimorar tecnologias voltadas para a geração de energia renovável e limpa para que, assim, se promova um desenvolvimento mais sustentável. Nesse sentido, o presente estudo objetiva fazer uma análise de viabilidade para a implementação de plantas termossolares no município de Garanhuns - PE, considerando seus aspectos morfoclimáticos.

Caracterização da área de estudo

O município de Garanhuns (Figura 8) se localiza na Região Nordeste do Brasil, na Mesorregião do Agreste de Pernambuco, à 230 km da capital do estado, Recife. Sua sede está em uma altitude de 893 m e se localiza nas coordenadas geográficas de 8° 53' 25'' de latitude sul e 36° 29' 34'' de longitude oeste, apresentando clima tropical úmido subúmido e seco subúmido do tipo mesotérmico. O município possui 458,5 km² de extensão territorial e população estimada de 140.577 habitantes em 2020, ficando, assim, sua densidade demográfica em torno de 306,6 hab./km² (IBGE, 2021).

2. Material e métodos



Figura 8 - Localização do município de Garanhuns-PE. Fonte: do autor, adaptado do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2021).

Análise da viabilidade solar

A análise da viabilidade para instalação de plantas termossolares em Garanhuns foi realizada com base nos dados geomorfológicos, sabendo-se que a incidência solar é maior em regiões com

terrenos planos, pois a irradiação incide de forma perpendicular e, com isso, menos esforços para instalar a planta será necessário.

Dessa forma, os dados sobre os aspectos fisiográficos do município de Garanhuns foram

analisados com base no trabalho de Costa et al. (2015), no qual realizaram um levantamento hipsométrico do município e produziram, entre

outros, o mapa de altimetria (Figura 9) e do relevo e sombreado (Figura 10), além do perfil topográfico longitudinal (Figura 11).

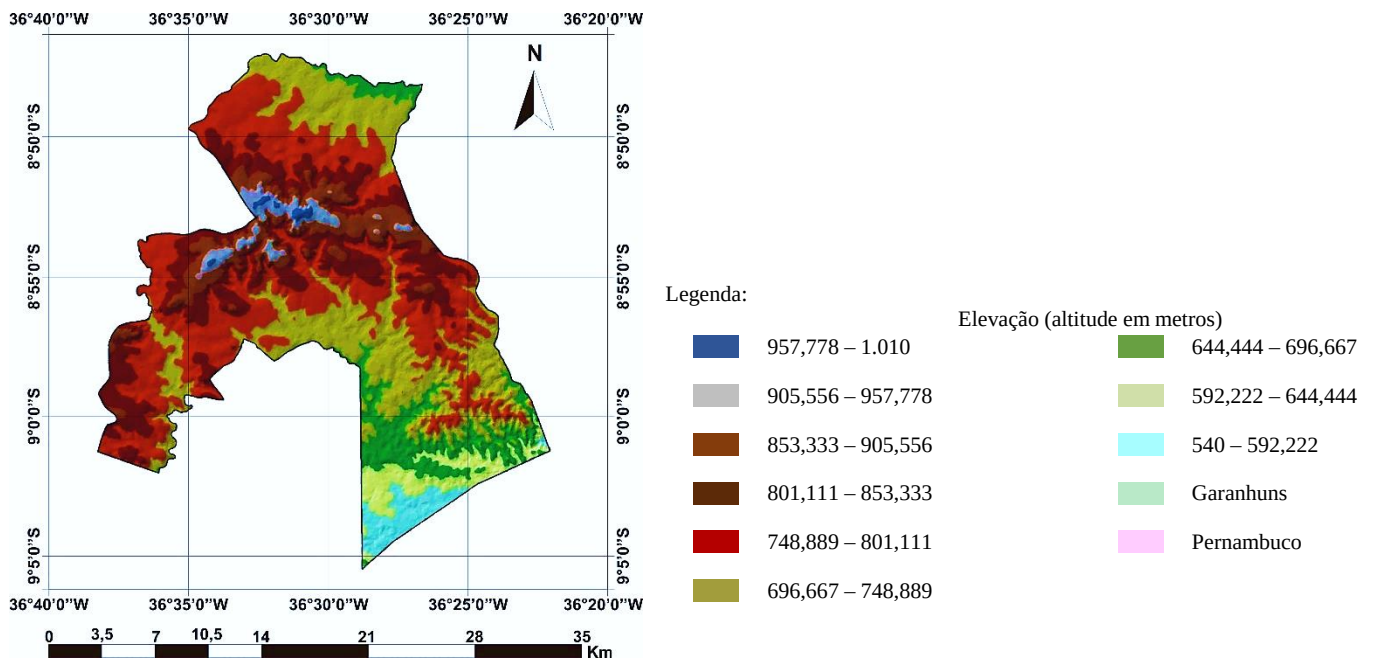


Figura 9 - Garanhuns-PE: Hipsometria. Fonte: adaptado de Costa et al. (2015).

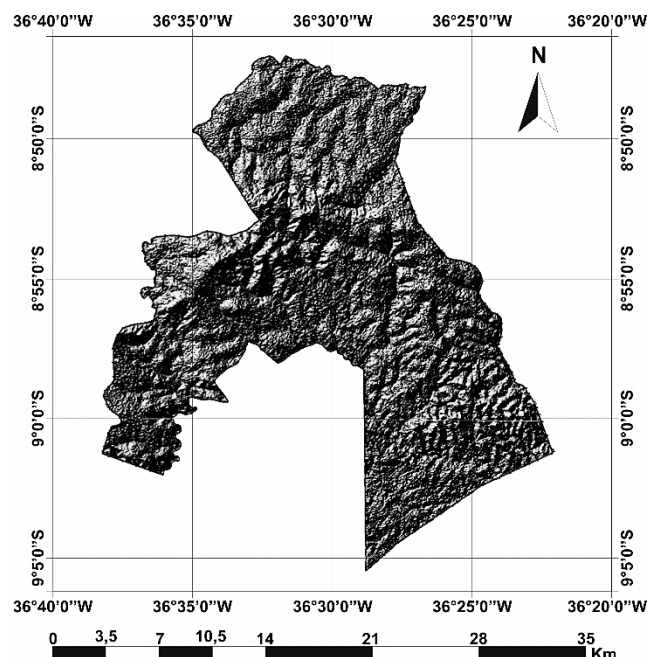


Figura 10 - Garanhuns-PE: Relevo sombreado. Fonte: adaptado de Costa et al. (2015).

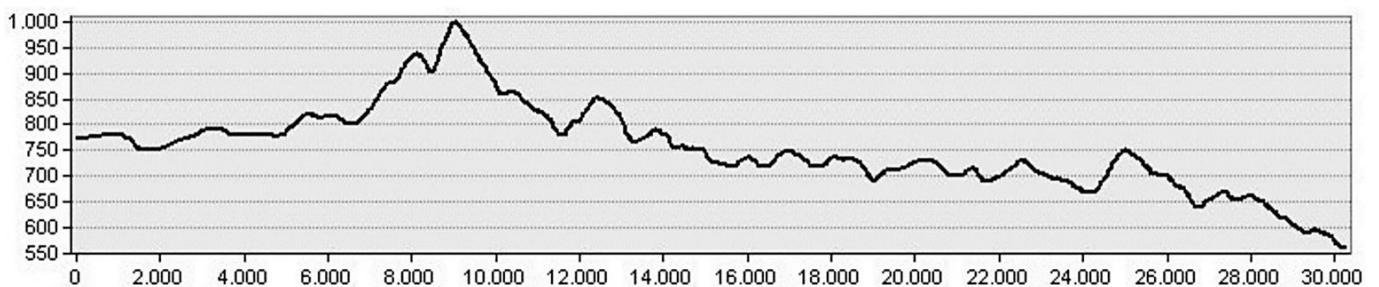


Figura 11 - Garanhuns-PE: Perfil topográfico longitudinal (m/m). Fonte: Costa et al. (2015).

Para identificar a viabilidade foi considerada a *Direct Normal Irradiance* (DNI) ou irradiação solar direta mínima requerida, sendo de 2.000 kW/m²/ano ou 5,5 kWh/m²/d, de acordo com Schlecht e Meyer (2012). Esses dados foram obtidos ao analisar os mapas disponibilizados pelo Atlas Eólico e Solar de Pernambuco, que caracteriza e avalia os potenciais de geração de eletricidade, através das fontes de energia eólica e solar em todo o território estadual. Para tanto, foram extraídos, a partir do Atlas citado, os

mapas do território do município de Garanhuns, apresentando a radiação anual direta (Figura 12), o potencial solar geográfico (Figura 13), que avalia as áreas propícias, com restrições ambientais, à instalação de plantas solares, e o potencial solar técnico (Figura 14), que, além das restrições ambientais, considera as áreas de produção agrícola e regiões com radiação solar anual direta menor que 5,8 kWh/m²/dia, no referido município.

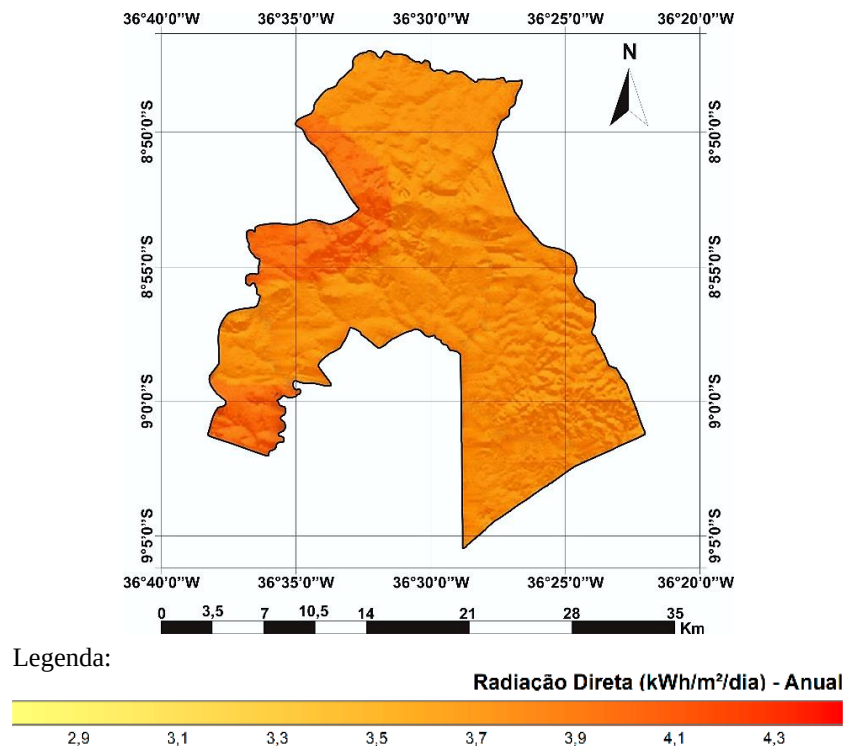


Figura 12 - Garanhuns-PE: DNI. Fonte: adaptado do Atlas Eólico e Solar de Pernambuco (2021).

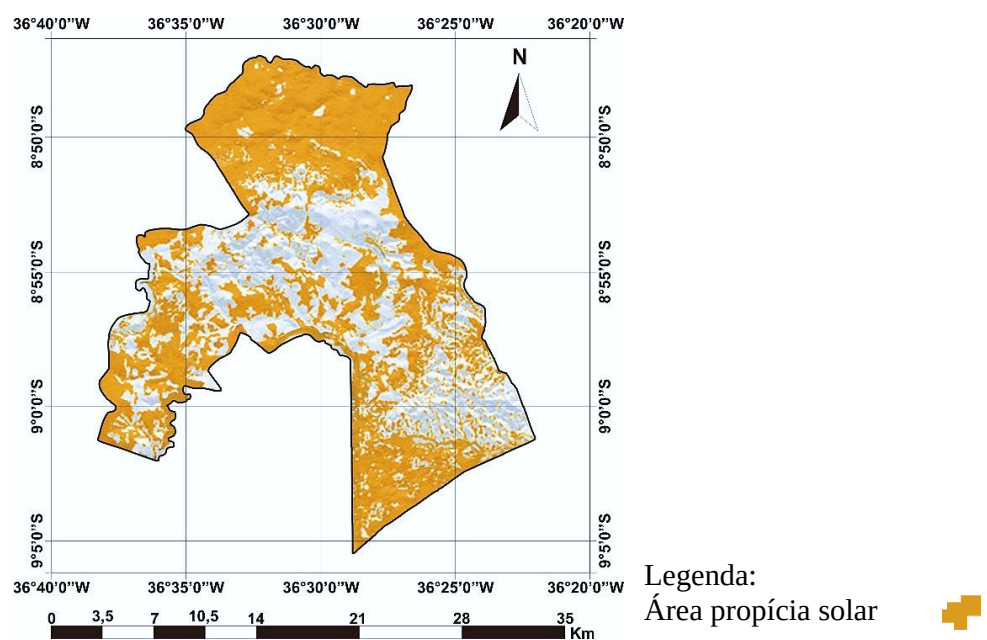


Figura 13 - Garanhuns-PE: Potencial solar geográfico. Fonte: adaptado do Atlas Eólico e Solar de Pernambuco (2021).

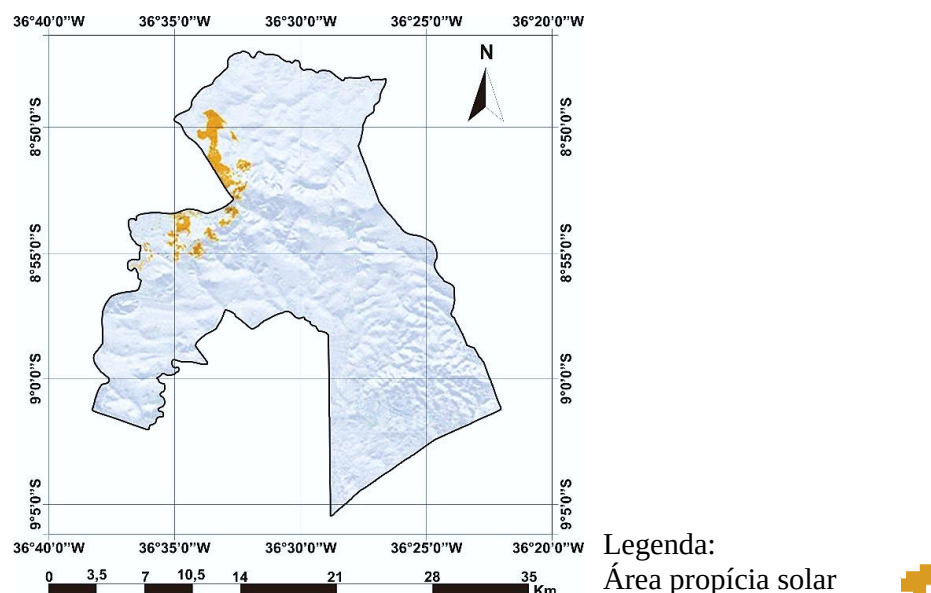


Figura 14 - Garanhuns-PE: Potencial solar técnico. Fonte: adaptado do Atlas Eólico e Solar de Pernambuco (2021).

3. Resultados e discussão

O território do município de Garanhuns apresenta bastante variações de altitudes (Figura 9) e, com isso, seu relevo é bastante irregular, o que provoca bastante sombreamento em seu território. Esse fato pode ser confirmado na Figura 10, que representa o relevo sombreado na região do município, observando-se que, devido às elevações, muitas áreas apresentam amplitude de sombreamento em qualquer hora do dia, caracterizadas pelas áreas mais escuras do mapa, e também na Figura 11, apresentando o perfil topográfico longitudinal do município, no qual se percebe a ausência de planícies, fator natural preponderante para melhor incidência da irradiação solar, conforme Schlecht e Meyer (2012). No mapa da Figura 12, observou-se que, em sua maior parte, no território do município de Garanhuns, o DNI está abaixo de 4,0 kWh/m²/d, o que indica um índice anual em torno de 1.460 kWh/m²/ano. Apenas duas pequenas faixas territoriais apresentam DNI acima de 4,3, uma ao noroeste e outra ao sudoeste do município.

A Figura 13 apresenta o potencial geográfico de Garanhuns para instalação de plantas solares. Nela, observaram-se alguns trechos potencialmente favoráveis para a implementação de algum tipo de tecnologia termossolar. Essas áreas em destaque no mapa consideram apenas os fatores naturais já descritos, e seriam áreas propícias à instalação de plantas solares, pois eventualmente possuem a incidência solar direta adequada para tais projetos, porém, sem considerar outros fatores, como o sombreamento causado pelas elevações ou a baixa insolação no período de inverno.

No entanto, a Figura 14, traz um cenário consideravelmente desfavorável para implantação de

plantas solares em Garanhuns. Nesse mapa é possível observar que apenas algumas áreas destacadas a noroeste do município possuem potencial tecnicamente viável para os projetos solares, tanto pelo aspecto ambientais e econômicos, quanto pela presença de irradiação solar favorável, conforme Schlecht e Meyer (2012) e o Atlas Eólico e Solar de Pernambuco (2021). Dessa forma, esses fatos sugerem uma grande escassez de áreas propícias, em Garanhuns, para a implantação de uma planta termossolar, dado que não basta apenas analisar a geografia da região, mas também outros fatores, como gastos com correções do terreno e infraestrutura, conforme apontam Islam et al., 2018.

4. Conclusão

Diante do exposto, pode-se concluir que a instalação de plantas termossolares no município de Garanhuns pode ser vista como inviável tecnicamente ou impraticável, principalmente devido à falta de áreas com irradiação solar direta suficiente, pois, conforme os mapas analisados, o município não apresenta muitas regiões que alcancem mais de 5.000 kWh/m²/ano. Outros fatores corroboram essa situação desfavorável, como a irregularidade geomorfológica do território do município, que provoca uma intensa amplitude de sombreamento e, com isso, reduz consideravelmente a insolação e, conseqüentemente, a irradiação solar direta em grande parte do território.

Referências

Abubakkar, A., Selvakumar, P., Rajagopal, T., Tamilvanan, A., 2021. Development of concentrating dish and solar still assembly for sea water desalination. Materials Today: Proceedings

- 45, 974-980, doi: <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.043>
- Arora, R., Kaushik, S.C., Kumar, R., Arora, R., 2016. Multi-objective thermo-economic optimization of solar parabolic dish Stirling heat engine with regenerative losses using NSGA-II and decision making. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 74, 25-35. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.07.010>
- Atlas Eólico e Solar de Pernambuco, 2021. Disponível: <http://www.atlaseolicosolar.pe.gov.br>. Acesso: 30 out. 2021.
- Baharoon, D.A., Rahman, H.A., Omar, W.Z.W., Fadhl, S.O., 2014. Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, 996-1027.
- Bellos, E., Tzivanidis, C., Tsimpoukis, D., 2018. Thermal, hydraulic and exergetic evaluation of a parabolic trough collector operating with thermal oil and molten salt based nanofluids. *Energy Conversion and Management* 156, 388-402. doi: <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.051>
- Beltrán-Chacón, R., Velázquez-Limón, N., Saucedo-Carvajal, D., 2012. Análisis y diseño de un sistema de generación eléctrica termosolar con concentrador de disco parabólico y motor Stirling de 2.7 kW enfriado por aire. *Ingeniería, Investigación y Tecnología* 13, 43-53, 2012. doi: <http://doi.org/10.22201/ii.25940732e.2012.13n1.005>
- Benitez, V.H., Pacheco-Ramírez, J., Armas-Flores, R.V., 2015. Propuesta para la implementación de una red inalámbrica de sensores inteligentes para un sistema de concentración solar con tecnología de torre central. *Sistemas, Cibernética e Informática* 12, 66-74.
- Brito, M.O., Americano, M.V., Pepe, I.M., 2019. Thermosolar didactic plan for renewable energy study with applications: modeling, simulation and control. *Revista de Ensino de Engenharia* 38, 126-139. doi: <http://doi.org/10.5935/2236-0158.20190013>
- Cerqueira, T.B., Domingues, M.A.O., Lyra, M.R.C.C., 2019. Uso de um concentrador solar parabólico de foco fixo de 0,30 m² para pasteurizar água em bateladas. *Revista Brasileira de Energia Solar* 10, 121-130.
- Costa, S.O.S., Ramos, R.P.S., Deus, R.A.S.G., Silva, S.A., Gomes, D.D.M., 2015. Caracterização Fisiográfica do Município de Garanhuns-PE. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria* 19, 913-922. doi: <https://doi.org/105902/2236117015549>
- Cruz, N., Álvarez, J., Redondo, J., Fernández-Reche, J., Berenguel, M., Monterreal, R., Ortigosa, P., 2017. A new methodology for building-up a robust model for heliostat field flux characterization. *Energies* 10, p. 730. doi: <http://doi.org/10.3390/en10050730>
- García, D., Prieto, J.I., 2012. A non-tubular Stirling engine heater for a micro solar power unit. *Renewable Energy* 46, 127-136. doi: <http://doi.org/10.1016/j.renene.2012.03.025>
- García Marín, R., Espejo Marín, C., 2010. La energía solar termoeléctrica en España. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense* 30, 81-105.
- Gea, M.D., Saravia, L., Altamirano, M., Placco, C., Bárcena, H., Hongn, M.E., 2010. Aspectos óptico geométricos de un concentrador solar Fresnel lineal para aplicaciones térmicas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 14, 215-222.
- Habchi, A., Hartiti, B., Labrim, H., Fadili, S., Belouaggadia, N., Benaissa, M., Benyoussef, A., EZ-Zahraouy, H., Ertugrul, M., Ntsoenzok, E., 2021. Numerical investigation of a new hybrid system, integrating parabolic trough concentrator with a cylindrical thermoelectric generator. *Journal of Interfaces, Thin Films, and Low Dimensional Systems* 3, 251-267. doi: <http://doi.org/10.22051/jitl.2021.33504.1047>
- Hegedus, S., Luque, A., 2011. Achievements and challenges of solar electricity from photovoltaics. *Handbook of Photovoltaic Science And Engineering* 1-38. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, U.K. doi: <http://doi.org/10.1002/9780470974704.ch1>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021a. Cidades@. Disponível: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/garanhuns/panorama>. Acesso: 8 jun.2021.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021b. Cidades@. Disponível: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/panorama>. Acesso: 8 jun.2021.
- Islam, M.T., Huda, N., Abdullah, A.B., Saidur, R., 2018. A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91, 987-1018.
- Joardder, M.U.H., Halder, P.K., Rahim, M.A., Masud, M.H., 2017. Solar pyrolysis. *Clean Energy for Sustainable Development*, 213-235. doi: <http://doi.org/10.1016/b978-0-12-805423-9.00008-9>
- Khanmohammadi, S., Chaghakaboodi, H., Abdi, Musharavati, F., 2021. A new design of solar tower system amplified with a thermoelectric unit to produce distilled water and power. *Applied Thermal Engineering* 197, 117406. doi:

<http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117406>

- Kiyae, S., Saboohi, Y., Moshfegh, A.Z., 2021. A new designed linear Fresnel lens solar concentrator based on spectral splitting for passive cooling of solar cells. *Energy Conversion and Management* 230, 113782. doi: <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113782>
- Li, X., Wang, Z., Yang, M., Yuan, G., 2020. Dynamic Simulation of a Novel Solar Polygeneration System for Heat, Power and Fresh Water Production based on Solar Thermal Power Tower Plant. *Journal of Thermal Science* 29, 378-392. doi: <http://doi.org/10.1007/s11630-020-1163-z>
- Lin, M., Sumathy, K., Dai, Y.J., Wang, R.Z., Chen, Y., 2013. Experimental and theoretical analysis on a linear Fresnel reflector solar collector prototype with V-shaped cavity receiver. *Applied Thermal Engineering* 51, 963-972. doi: <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.10.050>
- Mendes, J.F., Horta, P., 2010. A produção de electricidade por via termosolar em centrais de concentração. *Renováveis Magazine* 1, 30-35.
- Pigozzo Filho, V.C., Sá, A.B., Sousa, S.S., Passos, J.C., 2018. Projeto, construção e testes de um protótipo concentrador solar Fresnel linear para geração direta de vapor para processos industriais. *Congresso Brasileiro de Energia Solar*, Gramado.
- Piña-Ortiz, A., Hinojosa, J.F., Perez-Enciso, R.A., Maytorena, V.M., Estrada, C., Pérez-Rábago, C.A., Calleja, R.A., 2018. Experimental analysis of a flat plate receiver for measurement of low thermal power of a central tower solar system. *Aip Conference Proceedings* 2033. doi: <http://doi.org/10.1063/1.5067067>
- Reyes, J.J., Zacarías, A., Jiménez, J.A., Pineda, J., Nieto, M., Angeles, R.A., 2020. Simulación de un concentrador solar de disco parabólico para producción de potencia y enfriamiento. In: *CIES2020: As Energias Renováveis na Transição Energética: Livro de Comunicações do XVII Congresso Ibérico e XIII Congresso Ibero-americano de Energia Solar*. Lisboa.
- Schlecht, M., Meyer, R., 2012. Site selection and feasibility analysis for concentrating solar power (CSP) systems. *Concentrating Solar Power Technology* 91-119. doi: <http://doi.org/10.1533/9780857096173.1.91>
- Soltani, S., Kasaeian, A., Sokhansefat, T., ShAFII, M.B., 2018. Performance investigation of a hybrid photovoltaic/thermoelectric system integrated with parabolic trough collector. *Energy Conversion and Management* 159, 371-380. doi: <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.091>
- Souza, L.F.L., Fraidenraich, N.; Tiba, C., Gordon, J.M., 2021. Linear aplanatic Fresnel reflector for practical high-performance solar concentration. *Solar Energy* 222, 259-268. doi: <http://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.002>
- Sridhar, K., Lingaiah, G., Kumar, G.V., Kumar, S.A., Ramakrishna, G., 2018. Performance of cylindrical parabolic collector with automated tracking system. *Applied Solar Energy* 54, 134-138. doi: <http://doi.org/10.3103/s0003701x18020135>
- Tavakolpour, A.R., Zomorodian, A., Golneshan, A.A., 2008. Simulation, construction and testing of a two-cylinder solar Stirling engine powered by a flat-plate solar collector without regenerator. *Renewable Energy* 33, 77-87. doi: <http://doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.004>
- Voudoukis, N.F., 2018. Photovoltaic technology and innovative solar cells. *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science* 2, 1-7. doi: <http://doi.org/10.24018/ejece.2018.2.1.13>
- Wang, G., Wang, F., Shen, F., Chen, Z., Hu, P., 2019. Novel design and thermodynamic analysis of a solar concentration PV and thermal combined system based on compact linear Fresnel reflector. *Energy* 180, 133-148. doi: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.082>
- Weinstein, L.A., Loomis, J., Bhati, B., Bierman, D.M., Wang, E.N., Chen, G., 2015. Concentrating solar power. *Chemical Reviews* 115, 12797-12838.
- Yalçındkaya, Ç., Şenol, R., 2020. Design and performance of cylindrical-parabolic solar collectors with different control systems. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-17. doi: <http://doi.org/10.1080/15567036.2020.1829192>
- Yousefzadeh, H., Tavakolpour-Saleh, A.R., 2021. A novel unified dynamic-thermodynamic method for estimating damping and predicting performance of kinematic Stirling engines. *Energy* 224, 120222. doi: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120222>
- Zare, S., Tavakolpour-Saleh, A.R., 2016. Frequency-based design of a free piston Stirling engine using genetic algorithm. *Energy* 109, 466-480. doi: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.119>
- Zilanld, G.A., Eray, A., 2017. Feasibility study of dish/stirling power systems in Turkey. *Aip Conference Proceedings* 1850, 160029-1-160029-9. doi: <http://doi.org/10.1063/1.4984563>