

Análise de viabilidade para implantação de um sistema eletrogerador heliotérmico no município de Petrolina, Pernambuco, com base em matriz esforço - impacto

Luís Roberto Cavalcanti da Silva^{1*} , Fernando Leite Nunes da Costa² , Neide da Cruz Gonzaga¹ , José Nilton Silva de Souza¹ , Ricardo Brauer Vigoderis¹ 

1 Mestrado em Ciências Ambientais, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) – Garanhuns-PE, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE). Avenida Barão de Nazaré, 172 – São José – CEP: 55.295.135 – Garanhuns-PE

2 Mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) – Recife-PE. Av. Dom Manuel de Medeiros, S/N – Dois Irmãos – CEP: 52171-900 – Recife-PE

*Autor para correspondência: luis.r.c.silva@gmail.com

Recebido em 13 de dezembro de 2021.

Aceito em 05 de julho de 2022.

Publicado em 20 de julho de 2022.

Resumo – Considerando a crescente demanda energética mundial, aliada aos impactos ambientais causados pela dependência de combustíveis fósseis, responsáveis pelo aquecimento global e as mudanças climáticas, faz-se necessário a implementação de fontes limpas de energia para mitigar tais danos. Além disso, a energia hidráulica se destaca na matriz energética brasileira e, apesar de ser considerada limpa, gera impactos devido à área de inundação. Como agravante, as crises energéticas brasileiras motivam o acionamento de usinas termelétricas, mais onerosas e poluentes. Assim, há um desafio em transformar o sistema energético, tornando-o mais sustentável. Neste contexto, as fontes de energia renováveis apresentam grande potencial para diversificação energética nacional, devendo, assim, serem mais exploradas, como a energia solar, fonte energética limpa e renovável, que pode ser utilizada com painéis fotovoltaicos ou em concentrados heliotérmicos. Dessa forma, considerando a incidência solar em grande parte do território brasileiro, o objetivo deste estudo é simular o potencial de instalação de uma planta heliotérmica no município de Petrolina-PE, utilizando a matriz esforço por impacto como metodologia, a qual aponta inviabilidade, com o aumento do esforço, e viabilidade, com o aumento do impacto. Nesse sentido, observou-se grande potencial para implantação de uma planta heliotérmica numa vasta região do território do município.

Palavras-chave: Energias alternativas. Recursos renováveis. Recursos energéticos. Energia solar.

Feasibility analysis for the implementation of a heliothermal electrical generator system in the city of Petrolina, Pernambuco, with an effort-impact matrix

Abstract – Considering the growing global energy demand, combined with the environmental impacts caused by dependence on fossil fuels, responsible for global warming and climate change, it is necessary to implement clean energy sources to mitigate such damage. In addition, hydraulic energy stands out in the

Brazilian energy matrix and, while it is considered a clean energy source, its flooded areas generate impacts. As an aggravating factor, the Brazilian energy crises motivate the activation of thermoelectric plants, which are more costly and polluting. Thus, there is a challenge to make the energy system more sustainable. In this context, renewable energy sources show great potential for national energy diversification, and merit further exploitation, one such example being solar energy, a clean and renewable energy source, which can be used with photovoltaic panels or in heliothermal concentrates. Thus, considering the solar incidence in a large part of Brazilian territory, the objective of this study is to simulate the potential for installation of heliothermic plants in the city of Petrolina-PE, using the effort-by-impact matrix as a methodology, which points to invalidity, with the increased effort, feasibility, from the increased impact. Therefore, there was great potential for the implantation of one heliothermic plant in a vast region of the municipality's territory.

Keywords: Alternative energies. Renewable resources. Energy resources. Solar energy.

Análisis de factibilidad para la implementación de un sistema generador eléctrico termosolar en la ciudad de Petrolina, Pernambuco, basado en una matriz de esfuerzo impacto

Resumen – Considerando la creciente demanda global de energía, combinada con los impactos ambientales provocados por la dependencia de los combustibles fósiles, responsables del calentamiento global y el cambio climático, es necesario implementar fuentes de energía limpia para mitigar dichos daños. Además, la energía hidráulica se destaca en la matriz energética brasileña y, a pesar de ser considerada limpia, genera impactos por el área inundada. Como agravante, las crisis energéticas brasileñas motivan la activación de centrales termoeléctricas, que son más costosas y contaminantes. Por tanto, existe un desafío en la transformación del sistema energético, haciéndolo más sostenible. En este contexto, las fuentes de energías renovables tienen un gran potencial para la diversificación energética nacional y, por lo tanto, deben explorarse más, como la energía solar, una fuente de energía limpia y renovable, que se puede utilizar con paneles fotovoltaicos o en energía solar concentrada. Así, considerando la incidencia solar en gran parte del territorio brasileño, el objetivo de este estudio es simular el potencial de instalación de una central termosolar en la ciudad de Petrolina-PE, usando como metodología la matriz esfuerzo por impacto lo que apunta a la invalidez, con el mayor esfuerzo, y la factibilidad, con el impacto creciente. En este sentido, se observó un gran potencial para la implantación de una central termosolar en una extensa región del territorio del municipio.

Palabras clave: Energías alternativas. Recursos renovables. Recursos energéticos. Energía solar.

Introdução

O incentivo ao seguimento de fontes de energias renováveis é primordial para o enfrentamento das crises energéticas e das mudanças climáticas observadas ao longo das décadas, visto que a energia elétrica é um elemento crucial para o desenvolvimento econômico de um país, pois quanto mais ele se desenvolve, mais aumenta a demanda por energia (Furtado 2010; Ravi e Reddy 2012). Nesse sentido,

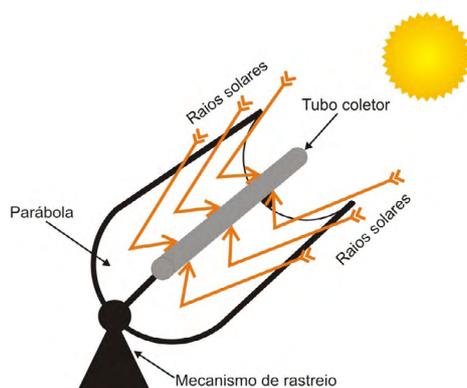
a produção de energia de forma limpa, segura e sem emissão de gases de efeito estufa são pontos a serem considerados na temática mundial quando se trata de desenvolvimento sustentável.

Diante disso, o aproveitamento da energia emitida pelo Sol representa um dos principais métodos renováveis e limpos de transformação energética, se destacando pela sua versatilidade em aplicações que demandam energia térmica ou na produção de energia elétrica, seja em uma grande indústria ou em uma pequena residência (Cerqueira *et al.* 2019). Nesse sistema, os processos de geração elétrica podem ocorrer, principalmente, por duas formas, uma delas é pela conversão da energia solar diretamente em energia elétrica através de placas fotovoltaicas, que utilizam a luz solar para excitar a reação de semicondutores e, com isso, liberar elétrons; o outro modo consiste em sistemas de captação termossolar, com o aproveitamento da energia solar térmica para o aquecimento de fluidos utilizados para aquecer água e gerar energia mecânica através das altas pressões dos vapores e, assim, acionar um eletrogerador (Brito *et al.* 2019). Com isso, a geração heliotérmica, se apresenta como uma opção promissora, dado que faz uso de um recurso abundante, irrestrito e inesgotável, que está em constante crescimento desde a primeira planta comercial entrar em operação, em 1991, principalmente nos Estados Unidos e na Espanha (Islam *et al.* 2018; Bahatoon *et al.* 2014; Weinstein *et al.* 2015).

A energia termossolar ou heliotérmica possui diversas aplicações, pois além de ser utilizada para gerar eletricidade, pode ainda ser aplicada no aquecimento das águas residenciais ou prediais, nas indústrias de cimento e de etanol, na secagem de produtos agrícolas, entre outros (Brito *et al.* 2019). Basicamente, funciona de modo a concentrar os raios solares e, com isso, obter temperaturas elevadas, acima de 150 °C (Pigozzo Filho *et al.* 2018). Contudo, as temperaturas podem chegar a 400 °C, com a utilização de óleos térmicos ou a 600 °C, utilizando sais fundidos (Bellos 2018). Para a geração de eletricidade, o sistema heliotérmico pode ser aplicado principalmente de quatro modos distintos, denominados “sistemas térmicos solares concentradores”, são eles, o coletor cilíndrico-parabólico, o coletor linear Fresnel, os discos parabólicos e as torres centrais (García Marín e Espejo Marín 2010; Mendes e Horta, 2010).

Os coletores cilindro-parabólicos funcionam pelo princípio geométrico, pelo qual os raios solares são refletidos pelo espelho da calha parabólica, se concentrando em uma linha focal pequena, conforme mostra a Figura 1, e multiplica a intensidade da irradiação em cerca de 30 a 80 vezes, produzindo, assim, energia térmica em altas temperaturas (Mendes e Horta, 2010; Sridhar *et al.* 2018). Para melhor eficiência, a calha parabólica deve seguir o movimento aparente do Sol para, assim, garantir que os raios solares a atinjam de forma perpendicular e, para isso, alguns sistemas utilizam sensores de GPS para rastrear o posicionamento solar (Yalçđnkaya, 2020).

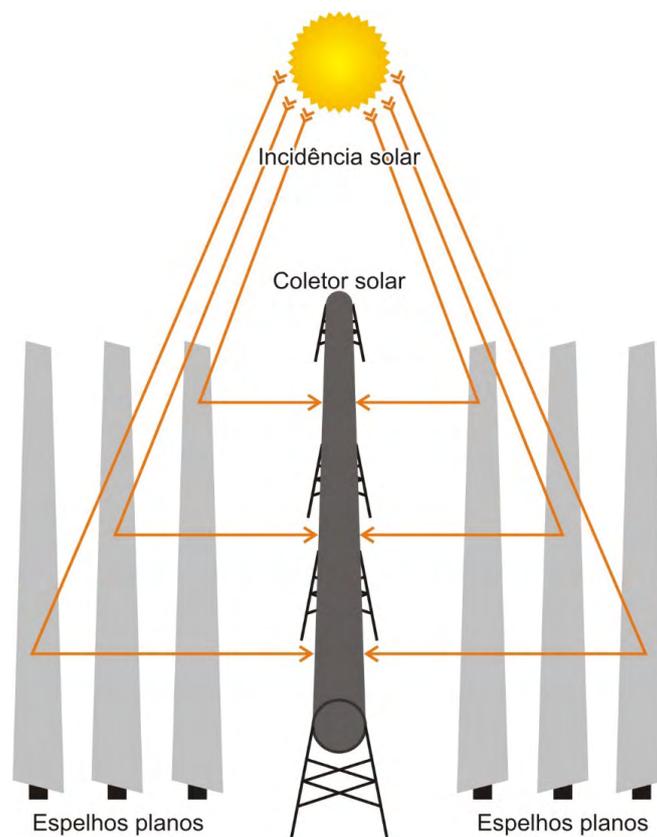
Figura 1. Coletor solar cilindro-parabólico.



Fonte: adaptado de Joardder (2017).

Os concentradores de reflexão linear de Fresnel (RLF) utilizam uma série de espelhos ou materiais reflexivos planos para distribuir uniformemente a densidade da radiação captada, direcionando-a para os coletores solar (Wang *et al.* 2019). Nesse sistema, as elevadas temperaturas resultantes da concentração dos raios solares são captadas por um tubo contendo um fluido condutor térmico (Figura 2), de forma semelhante ao coletor solar cilíndrico-parabólico, mas apresentando algumas vantagens, como menores custos das lentes e melhor uso do espaço ocupado (Wang *et al.* 2019; Souza *et al.* 2021). Porém, assim como em todas as tecnologias de concentração solar, para um aproveitamento eficiente de seu potencial, deve-se realizar um estudo detalhando os aspectos geométricos para melhor dimensionamento do sistema em relação aos requisitos de concentração solar, à adequação do terreno, ao monitoramento da irradiação solar que cada espelho deve receber e também à variação climática anual (Gea *et al.* 2010).

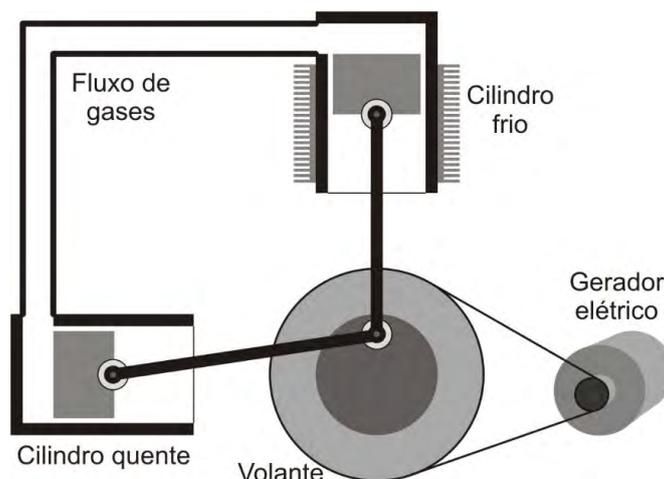
Figura 2. Layout de um concentrador RLF.



Fonte: adaptado de Wang *et al.* (2019).

Diferentemente dos coletores cilindro-parabólicos e do sistema RLF, a aplicação de discos parabólicos para geração de eletricidade, geralmente recorre a um eletrogerador acoplado a um motor Stirling (Figura 3), que funciona à combustão externa (Beltrán-Chacón *et al.* 2012). Esse tipo de motor representa um dos mais eficientes conversores térmicos que existem e, por poder ser acionado com a utilização de qualquer fonte externa de calor, é considerado uma excelente solução para a conversão da energia solar concentrada em energia mecânica, podendo ser utilizada principalmente para geração de eletricidade (Zare e Tavakolpour-Saleh 2016; Tavakolpour *et al.* 2008; Yousefzadeh e Tavakolpour-Saleh 2021).

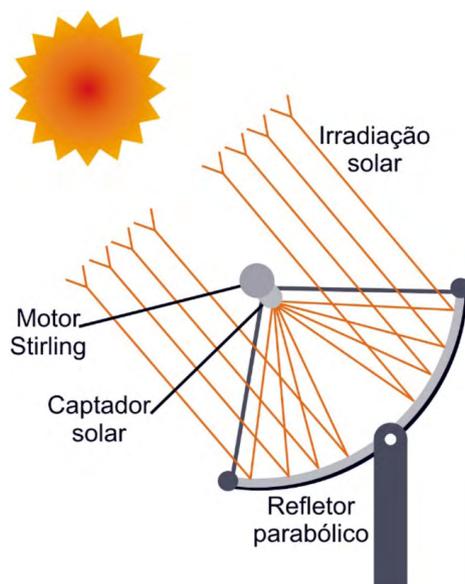
Figura 3. Característica de um motor Stirling.



Fonte: adaptado de García e Prieto (2012) e Magacho *et al.* (2019).

Devido a sua peculiaridade, os discos parabólicos podem ser construídos com diversos materiais e tamanhos, dependendo da aplicação e requisitos, com a possibilidade de serem aplicados tanto em situações simples, como os fogões solares, ou em complexos sistemas de usinas termelétricas de concentração solar (Cerqueira 2019). Dessa forma, para a geração de energia elétrica é aproveitada a propriedade óptica dos discos parabólicos de convergir a incidência solar em um único ponto focal, o qual se localiza o coletor térmico do motor Stirling (Figura 4) que, acionado pela elevada temperatura, transmite a força rotacional a um eletrogerador, que pode apresentar potenciais variáveis, conforme as dimensões específicas do projeto (Hernández Reyes *et al.* 2017; García Marín e Espejo Marín 2010; Reyes *et al.* 2020). Contudo, esse sistema apresenta algumas desvantagens em relação aos demais métodos de geração elétrica por concentração solar, tais como o elevado custo dos motores Stirling e a variação da velocidade de rotação, tornando a geração elétrica inconsistente (Delgado Filho *et al.* 2018).

Figura 4. Gerador solar termelétrico com disco parabólico e motor Stirling.



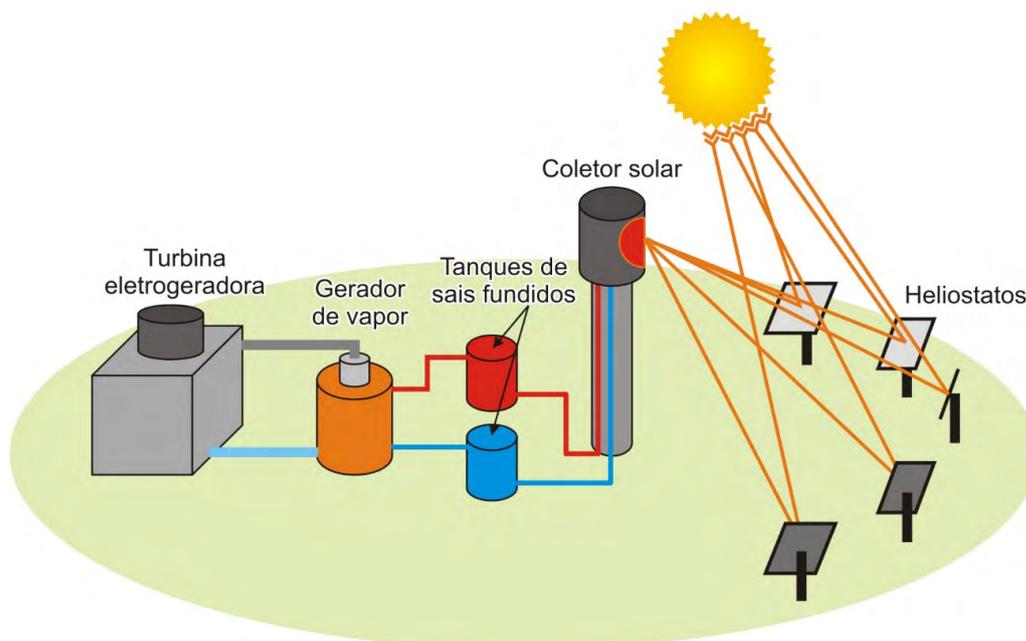
Fonte: Silva e Vigoderis (2021).

Atualmente, para esse sistema, tem-se desenvolvido microturbinas a gás, como alternativa aos motores Stirling, apresentando maior confiabilidade e maior eficiência de conversão calor-eletricidade (Delgado Filho *et al.* 2018).

Apesar das amplas vantagens ambientais e de disponibilidade aqui apontadas, o principal problema denotado pela energia solar é a sua intermitência, visto que essa fonte energética não está disponível durante todas as horas do dia. No entanto, com os sistemas de concentradores solares de torre central e cilindro-parabólicos, esse problema pode ser minimizado ou até inexistente, dependendo das características do local de instalação, já que esses sistemas são capazes de armazenar a energia térmica captada, podendo gerar energia elétrica durante a noite ou até mesmo em períodos nublados, no entanto, os concentradores de torre central levam vantagem nesse aspecto, por apresentar autonomia superior, de até 15 horas, e apresentar melhor eficiência na conversão da energia solar em energia elétrica, acima de 25%, contra 14% do sistema cilindro-parabólico (García Marín e Espejo Marín 2010).

O sistema heliotérmico de torre solar central (Figura 5) é composto principalmente pelos seguintes elementos: os heliostatos (placas refletoras móveis), torre central, sistema receptor ou coletor térmico e o sistema de bombeamento e refrigeração (García Marín e Espejo Marín 2010; Piña-Ortiz *et al.* 2018). A implantação de uma planta com esse sistema necessita de uma área ampla para a instalação dos heliostatos, que acompanham o movimento aparente do Sol e refletem sua radiação para o coletor solar, fixado no topo da torre e, com isso, amplia em até 600 vezes a irradiação solar (García Marín e Espejo Marín 2010). Após ser irradiado pelos heliostatos, o coletor aquece a temperaturas próximas ou até superiores a 1.000 °C e, assim, o fluido térmico, geralmente, sais fundidos, com temperaturas de até 800 °C, seguem para produzir vapores em alta pressão, em reservatórios contendo água. Esses vapores acionam mecanicamente a rotação de turbinas, que transmite a força motriz ao eletrogerador (Benitez *et al.* 2015; Piña-Ortiz *et al.* 2018).

Figura 5. Sistema heliotérmico de torre solar central.

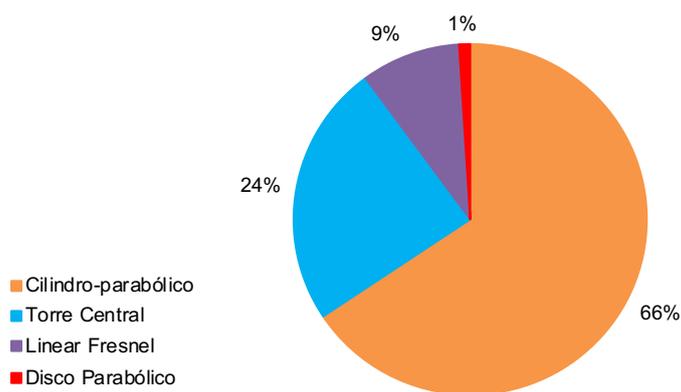


Fonte: adaptado de Cruz *et al.* (2017).

Cenário Mundial das Usinas Heliotérmicas

De acordo com dados do Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos Estados Unidos (NREL) havia, em 2019, 106 usinas heliotérmicas em operação no mundo, correspondendo a 5,9 gigawatts (GW) da capacidade total de geração de energia elétrica. Nesse contexto, a Figura 6 mostra as proporções percentuais das usinas em operação, que usam as quatro diferentes tecnologias de concentradores solares térmicos já citados e, nele, nota-se a predominância do uso do concentrador cilindro-parabólico.

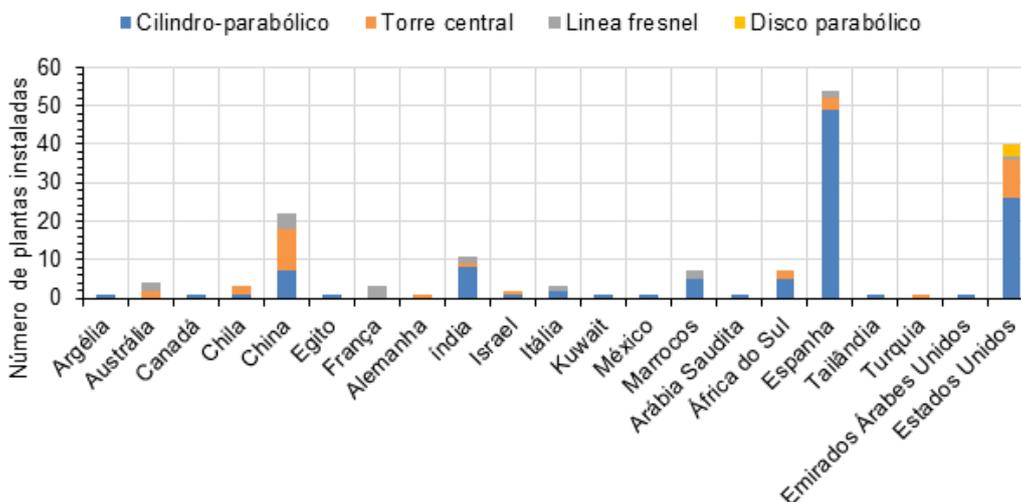
Figura 6. Porcentagem de tipos de concentradores utilizados para geração heliotérmica no mundo.



Fonte: NREL (2019).

As usinas heliotérmicas se apresentam dispostas nos cinco continentes, contudo, segundo a NREL, a Espanha, a China e os Estados Unidos são, respectivamente, os países que concentram o maior número de plantas em operação, conforme indica a Figura 7. Nele fica evidente que a tecnologia de concentrador cilindro-parabólico é a mais utilizada, permitindo afirmar que essa tecnologia apresenta um maior desenvolvimento, estando presente principalmente na Espanha e nos Estados Unidos. Esse último, se apresentando como o único país da lista a realizar investimentos no sistema de disco parabólico, enquanto na China, predomina o sistema de torre central (Vieira *et al.* 2018).

Figura 7. Plantas heliotérmicas em operação por país.



Fonte: Elbeh e Sleiti (2021).

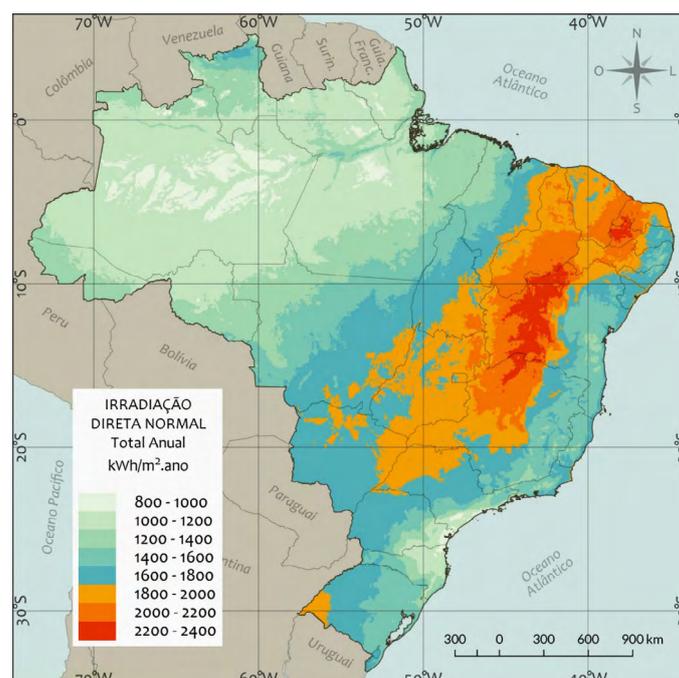
A eletrogeração a partir da concentração da energia solar só funciona com eficiência a partir da irradiação solar direta. Com isso, atualmente, para elaboração de um projeto de geração de energia elétrica a partir dessa fonte, a *Direct Normal Irradiance* (DNI), (ou irradiação solar direta) mínima requerida, é de aproximadamente 5,5 kWh/m²/d (energia diária em quilowatts-hora por metro quadrado), o que corresponde a 2.000 kWh/m²/ano (energia anual em quilowatts-hora por metro quadrado) (Schlecht e Meyer 2012). Assim sendo, quanto maior o valor do DNI, maior será a capacidade de geração de energia elétrica e da redução nos custos operacionais (Lodi 2011).

Além disso, para a instalação de uma planta heliotérmica deve-se considerar duas etapas. A primeira compreende a coleta e concentração da irradiação solar, necessitando, assim, de equipamentos importados, tais como os espelhos e os concentradores solares. A segunda etapa, compreende a geração de energia térmica e elétrica, é formada por maquinários com menor tecnologias agregadas, como a turbina, o sistema de resfriamento, as eletrobombas e as operações de construção civil (ANEEL 2015; BRASILENERGIA 2015), disponíveis comercialmente no Brasil.

Apesar da ausência tecnológica em equipamentos voltados para a coleta e concentração da energia solar, devido à localização geográfica na área intertropical do planeta, o Brasil possui regiões que apresentam elevados níveis de irradiação solar direta, característica relevante para a implantação de usinas heliotérmicas para geração elétrica. Contudo, o mercado brasileiro para plantas de concentradores solares é bastante embrionário, apesar de contar com regiões de ampla irradiação solar. (Silva e Codeceira Neto 2019; Vieira et al. 2018).

Nessa perspectiva, o Brasil possui muitas regiões com valores iguais ou superiores aos mínimos estabelecidos, acima de 2.000 kWh/m²/ano (Figura 8), principalmente na Região do Semiárido Nordeste, sendo a localização que oferece melhor disponibilidade no que se refere à irradiação solar, com valores maiores até 2.400 kWh/m²/ano de energia solar direta e baixa nebulosidade (Lodi 2011; Schlecht e Meyer 2012; Martins et al. 2012).

Figura 8. Total anual de irradiação solar direta normal.



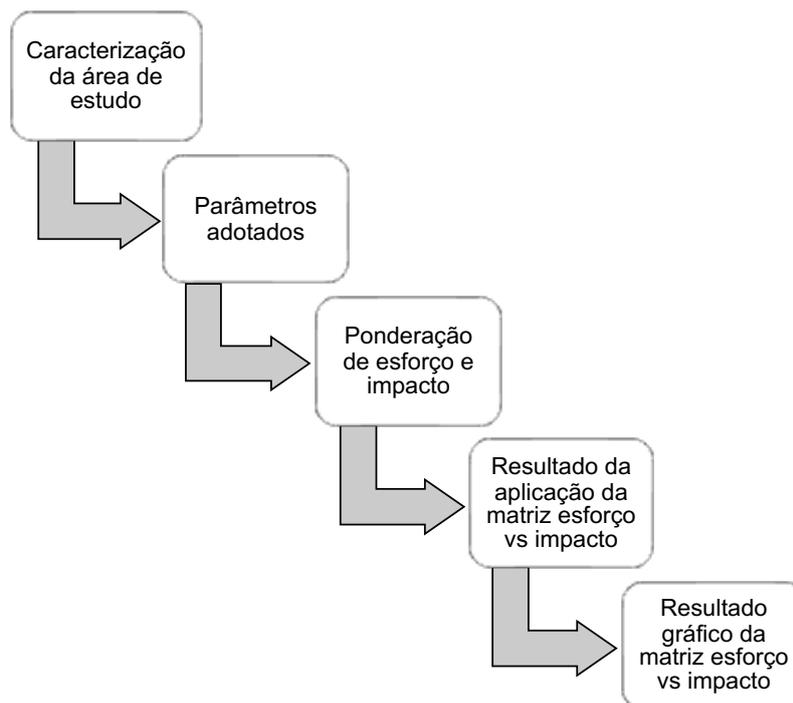
Fonte: Pereira et al. (2017).

No Brasil, como visto, o Semiárido Nordeste é a região que apresenta o maior potencial para aplicação da tecnologia de concentração solar, pois apresenta excelentes condições de irradiação solar direta, decorrentes da baixa intensidade de nuvens e dos baixos índices pluviométricos. Além disso, há disponibilidade de recursos hídricos, proximidade de rede elétrica e a existência de uma infraestrutura de transporte para locomoção de equipamentos e para realizar manutenção, requisitos indispensáveis para viabilizar a instalação de uma planta solar heliotérmica (Guimarães *et al.* 2012).

Material e métodos

A metodologia adotada neste estudo de viabilidade, baseou-se no método de matriz esforço por impacto, adotada em alguns trabalhos de referências da área, como os de Andersen *et al.* (2012) e os de Retorta *et al.* (2018). Nesse sentido, esse método aponta invalidade, com o aumento do esforço, e viabilidade, com o aumento do impacto. O fluxograma apresentado (Figura 9) mostra os processos executados nesta pesquisa para estabelecer a possibilidade teórica de implantação de uma planta de concentradores solar na região municipal de Petrolina/PE, no Sertão de Pernambuco.

Figura 9. Etapas do fluxo do processo metodológico.

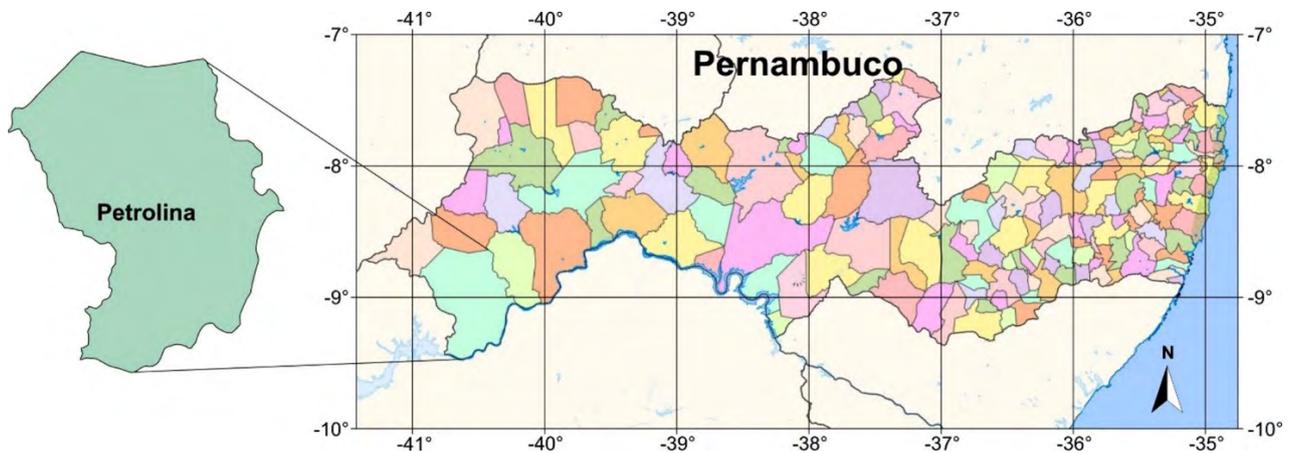


Caracterização da área de estudo

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município de Petrolina (Figura 10) localiza-se no estado de Pernambuco, no Nordeste brasileiro, à 712 km da capital do estado, Recife, com sua sede localizada nas coordenadas geográficas de 9° 23' 34" sul e 40° 30' 28" oeste. Esse município abrange cerca de 4.562 km² de extensão territorial, com 244,8 km² desse total correspondendo a área urbana. Ainda segundo o IBGE, a população estimada em 2021 é de 359.372 habitantes, com um Produto Interno Bruto (PIB) *per capita*, em 2018, de R\$ 19.445,59. No que se refere a climatologia,

conforme a classificação de Köppen e Geiger, o município possui clima semiárido quente (BSh), apresentando médias térmicas anuais elevadas, com temperaturas médias em torno de 27 °C, porém com médias de pluviosidade histórica baixa, em torno de 423 mm anuais.

Figura 10. Localização do município de Petrolina.



Fonte: adaptado do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2021).

Parâmetros adotados

Os parâmetros adotados para análise de viabilidade da implantação de uma planta heliotérmica em Petrolina se ancoram na literatura sobre o assunto, assim como consta na aplicação de Retorta *et al.* (2018) e no método empregado na plataforma Energia Heliotérmica *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ), de 2016. Nesse contexto serão analisados 12 parâmetros (Quadro 1), ou critérios, que indiquem a viabilidade para a instalação de uma planta heliotérmica no dito município, os quais são empregados considerando as características da região em estudo.

Quadro 1. Parâmetros para avaliação da viabilidade para implantação de uma planta heliotérmica.

Rede elétrica	Infraestrutura de transporte	Fornecimento de combustível	Recursos hídricos
Topografia	Propriedades do solo	Condições climáticas	Sismologia
Irradiância normal direta	Impacto ambiental	Aceitação Social	Permissões e Licenças

Fonte: Retorta *et al.* (2018).

Para ponderar esses parâmetros de viabilidade foram adotados os pesos de 1, 2 e 3, que indicam, respectivamente, os parâmetros com baixa, média e alta influência e, assim, avaliar a construção da matriz esforço e impacto. Nesse sentido, quanto mais alta a influência no eixo esforço, mais negativa se mostra à implantação, por outro lado, quanto maior for o impacto, mais relevante será à implantação, visto que este eixo trata do objetivo do trabalho. Com isso, a ponderação dos critérios foi realizada conforme a literatura vigente, em que mostram a relevância dos parâmetros para a região de estudo.

Resultados e discussão

Ponderações dos esforços e impactos

Para os parâmetros irradiância normal direta, rede elétrica, recursos hídricos e infraestrutura e transporte, Guimarães *et al.* (2012) mostram em seu trabalho o potencial que o Nordeste apresenta por contemplar esses requisitos. Dessa forma, o município de Petrolina adequa-se a essa situação, pois apresenta rede elétrica ampla e disponível, faz parte do sertão, sendo uma região com poucas nuvens e precipitações anuais, e possui recursos hídricos abundantes e disponíveis, pois margeia parte do Rio São Francisco. Com isso, a ponderação adotada nesses parâmetros foram 1, para esforço, e 3 para impacto.

Em relação ao critério de topografia, a área estudada apresenta muitas regiões de relevo plano, ideal para alocação dos equipamentos de plantas heliotérmicas, como é mostrado no estudo de Cunha *et al.* (2010). Eles concluem que 47,45% da área de Petrolina é de neossolos quartzarênicos e 26,39% dos argissolos amarelos e vermelho amarelos, essa última propriedade do solo tem a característica topográfica de região plana, com poucas ondulações, a qual é estipulada em até 3% de declividade. Com isso, a ponderação da topografia foi definida em 2 para o esforço, por permear ainda com algumas ondulações, e também 2 para o impacto, visto que dependerá da correta alocação dos maquinários e equipamentos. Já para a ponderação das propriedades do solo, o esforço atribuído foi 1 e o impacto, 3, pois os dados obtidos deixam claras as características do solo.

No Nordeste brasileiro, as regiões de argissolos amarelos, com relevo plano e suavemente ondulado, estão distribuídas em ambientes cobertos por vegetação de caatinga hiperxerófila (Cunha *et al.* 2010). Com isso, o parâmetro impacto ambiental, recebeu a ponderação 3, tanto para esforço quanto para impacto, tendo em vista a que o bioma da Caatinga brasileira é único no mundo e o seu desmatamento para implantação de plantas heliotérmicas, acarretaria grandes perdas ambientais.

Devido ao fator urbano apresentado no município de Petrolina, potencializado pela presença de aeroporto internacional e grandes rodovias, a sua economia, concentrada na agricultura irrigada e voltada para exportação, e na pecuária bovina, caprina e ovina, o parâmetro de fornecimento de combustível recebeu uma ponderação baixa para esforço, peso 1, e elevada para impacto, peso 3.

Para ponderar o critério aceitação social, foi considerado que a alocação de projetos heliotérmicos em Petrolina ficará, em todos os casos, exposta ao público, podendo gerar falta de entendimento do propósito da tecnologia implementada e suas implicações. Com isso, foi atribuído o peso 2 para esse parâmetro, tanto para o esforço, quanto para o impacto.

Conforme toda a estrutura geológica brasileira, o Sertão nordestino e, conseqüentemente, o território do município de Petrolina, não apresenta incidência sísmica considerável, evento natural substancialmente raro e que pouco irá influenciar no impacto e no esforço da matriz, o que, seguramente, determinou a adoção do peso 1 para ambas as análises.

Por fim, para o parâmetro permissões e licenças, o esforço se apresenta demasiadamente grande, devido a fatores burocráticos de concessões para se utilizar as áreas propícias à implantação de usinas heliotérmicas de grande porte e, com isso, foi atribuído o peso 3 na matriz. Da mesma forma, esse parâmetro é necessário para a regularização dos procedimentos de implantação, apontando-o como um critério de grande impacto, o que justifica, também, sua aplicação nesse atributo com peso 3.

O Quadro 2 traz os resultados consolidados da ponderação para cada parâmetro de viabilidade adotado, neste trabalho, para avaliar a viabilidade da implantação de uma planta heliotérmica em Petrolina.

Quadro 2. Ponderação dos parâmetros analisados em Petrolina-PE.

Parâmetros	Ponderação	
	Esforço	Impacto
Rede elétrica	1	3
Topografia	2	2
Irradiância normal direta	1	3
Infraestrutura de transporte	1	3
Propriedades do solo	1	3
Impacto ambiental	3	3
Fornecimento de combustível	1	3
Condições climáticas	1	3
Aceitação Social	2	2
Recursos hídricos	1	3
Sismologia	1	1
Permissões e Licenças	3	3

Fonte: dos autores (2022).

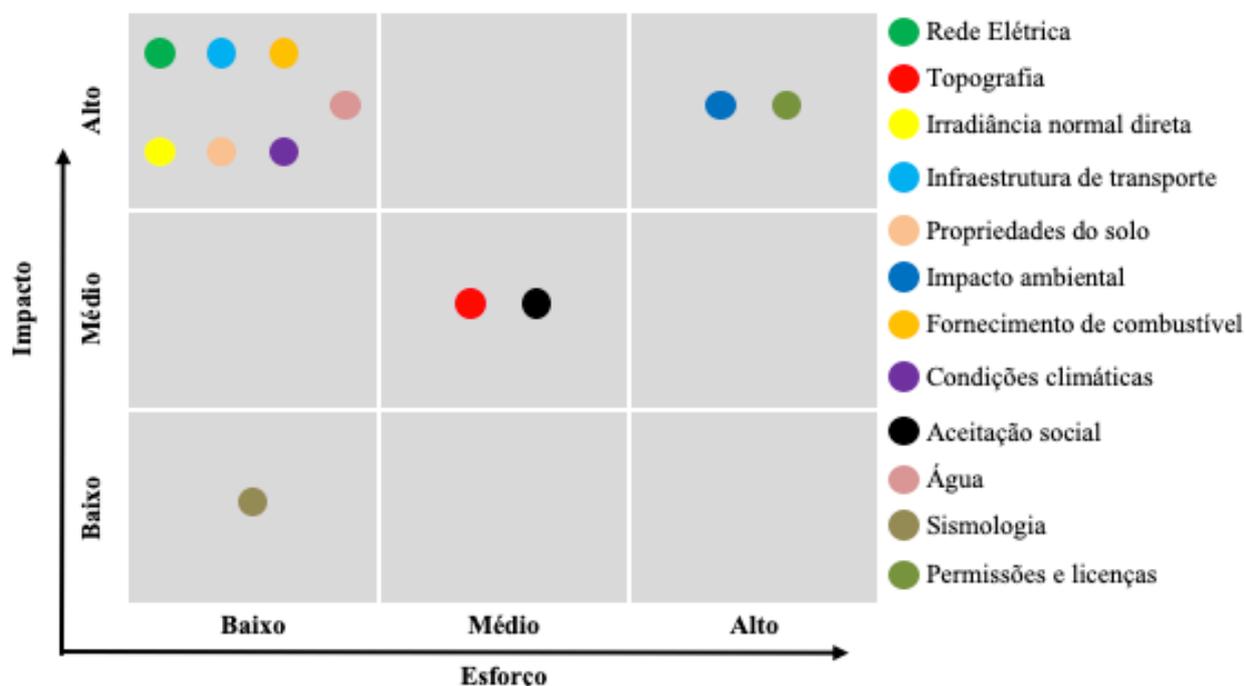
Resultado da aplicação matriz esforços versus impactos

A matriz de esforço e impacto aqui apresentada apresenta nove quadrantes, os quais indicam a relação entre o esforço aplicado em determinado atributo e seu respectivo impacto na execução de um projeto, no caso, uma planta heliotérmica no município de Petrolina. Com isso, a matriz visual é de grande importância para auxiliar na tomada de decisão e na possibilidade de implantação da referida planta.

Os dois eixos da matriz, o horizontal, relativo ao esforço, e o vertical, referente ao impacto, foi dividido em três níveis de ponderação: baixo, médio e alto. Dessa forma, conforme a ordem dos eixos, é possível haver nove possibilidades de interseções, assim relacionadas: baixo-baixo, baixo-médio, baixo-alto, médio-médio, médio-alto, alto-baixo, alto-médio e alto-alto. Nesse contexto, foi construída a matriz gráfica de esforço e impacto (Figura 11), conforme as ponderações consideradas nos parâmetros adotados para implantação de uma planta heliotérmica em Petrolina.

Pela matriz gráfica, observa-se que sete parâmetros se apresentaram com baixo esforço e com alto impacto, dois deles, com alto esforço e alto impacto, outros dois, com médio esforço e médio impacto, e um se mostrou com baixo esforço e baixo impacto. Com isso, nota-se que 58,33% dos fatores analisados apontam à viabilidade para a implantação de uma planta heliotérmica no município em estudo. Contudo, considerando o pior cenário, esses fatores representam 16,67% de possibilidades positivas na implantação, mas com alto grau de dificuldades.

Figura 11. Matriz esforço versus impacto.



Conclusão

Tomando por base a metodologia aplicada nesta pesquisa, pode-se afirmar que a cidade de Petrolina/PE possui, ao menos, os requisitos mínimos exigidos, conforme os parâmetros listados no Quadro 2, para a implantação de uma planta heliotérmica de geração de energia elétrica. Dessa forma, segundo o estudo realizado, mesmo com algumas adversidades identificadas pela matriz esforço e impacto, tais como, os entraves burocráticos no que se refere ao licenciamento dos projetos e os licenciamentos ambientais, em caso da implementação da planta em áreas de argilossolos, mais favoráveis devido ao seu relevo menos acidentado, o município apresenta viabilidade técnica e econômico para a instalação de, ao menos, uma planta de concentradores solar térmico. No entanto, seu projeto deve considerar fortemente o parâmetro Impactos ambientais, voltando investimentos para a preservação dos argilossolos e, conseqüentemente, da fauna e flora do lugar, pois se trata de uma região bastante impactada, historicamente, principalmente em relação ao bioma da Caatinga.

Participação dos autores: LRCS - Pesquisa sobre os tipos de tecnologias de concentração solar para geração de energia elétrica; Elaboração do Resumo e Conclusão do trabalho; Elaboração dos gráficos, imagens e quadros; Revisão do trabalho; NCG - Pesquisa sobre o Potencial Heliotérmico no Brasil e o Cenário Mundial das usinas heliotérmicas; FLNC - Elaboração dos Resultados e Discussões; JNSS - Elaboração do Material e Métodos; RBV - Orientador do trabalho.

Aprovação ética: Não houve necessidade de aprovação ética, por se tratar de estudos teóricos.

Disponibilidade dos dados: Os dados não estarão disponíveis em base ou repositório.

Fomento: Este trabalho não teve fontes de fomento.

Conflito de Interesses: Os autores declaram que não há conflito de interesses.

Referências

Andersen B, Fagerhaug, T, Beltz M. 2010. Root Cause Analysis and improvement in the healthcare sector. ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin, p. 256.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. 2015. Projeto estratégico: “Desenvolvimento da tecnologia nacional de geração heliotérmica de energia elétrica”. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília.

Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2017. 2. ed. São José dos Campos: INPE, doi: <http://doi.org/10.34024/978851700089>.

Bahatoon DA, Rahman HA, Omar WZW, Fadhl SO. 2014. Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 41:996-1027, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.008>.

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(1):43-53, doi: <http://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2012.13n1.005>.

Benitez, VH, Pacheco-Ramírez J, Armas-Flores RV. 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(2):66-74. Disponível: <http://www.iiisci.org/journal/risci/FullText.asp?var=&id=CB203VA15>. Acesso: 22/09/2021.

BRASILENERGIA, 2015. “A primeira heliotérmica”. Disponível: <http://brasilenergia.editorabrasilenergia.com/news/renovaveis/solar/2015/02/primeira-heliotermica-449936.html>. Acesso: 22 set. 2021.

Brito MO, Americano MV, Pepe IM. 2019. Thermosolar didactic plan for renewable energy study with applications: modeling, simulation and control. Revista de Ensino de Engenharia 38(1):126-139, doi: <http://doi.org/10.5935/2236-0158.20190013>.

Cerqueira TB, Domingues MAO, Lyra MRCC. 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(2). Disponível: <https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/286>. Acesso: 21/09/2021.

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(5):730, doi: <http://doi.org/10.3390/en10050730>.

Cunha TJE, Oliveira Neto MB, Giongo V, Taura TA, Araujo Filho JC, Silva MSL, Parahyba RBV, Lucena AMA. 2010. Solos da margem esquerda do rio São Francisco: município de Petrolina, Estado de Pernambuco. Embrapa Semiárido- Documentos (INFOTECA-E).

Delgado Filho, MA, Arađjo, NMFTS, Maia, FP, Tapia, GIM. 2018. A brief review on the advantages, hindrances and economic feasibility of stirling engines as a distributed generation source and cogeneration technology. Revista de Engenharia Térmica 17(1):49-57, doi: <http://doi.org/10.5380/reterm.v17i1.62258>.

Elbeh MB, Sleiti AK. 2021. Analysis and optimization of concentrated solar power plant for application in arid climate. *Energy Science & Engineering* 9(6):784-797, doi: <https://doi.org/10.1002/ese3.742>.

Furtado MC. 2010. Avaliação das oportunidades de comercialização de novas fontes de energia renováveis no Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

García D, Prieto JI. 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(2):81-105. Disponível: <https://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/view/AGUC1010220081A>. Acesso: 21/09/2021.

Gea MD, Saravia L, Altamirano M, Placco C, Bárcena H, Hongn ME. 2010. Aspectos óptico geométricos de un concentrador solar Fresnel lineal para aplicaciones térmicas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 14:215-222. Disponível: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/99555>. Acesso: 21/09/2021.

GIZ – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). 2014. GmbH, Parabolic Trough, State of the art and market overview. Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ), Berlin, Alemanha.

Guimarães APC, Cheroto S, Menezes PCP, Junior ALV, Nascimento MVG. 2012. Caracterização dos sítios potenciais na região do semi-árido brasileiro para implantação de Sistema Piloto Heliotérmico de Geração Elétrica. Relatório Técnico DG/1105/02 CEPEL, Projeto Gerahelio.

Hernández Reyes I, Lugo Chávez D, Abatal M, Díaz-Méndez SE, Anguebes-Franceschi F, Bassam A, Escalante Soberanis MA. 2017. Modelación térmica de un colector solar de disco parabólico mediante elementos finitos para la extracción de agua en aceites lubricantes usados. *Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán* 21(3). Disponível: <https://www.revista.ingenieria.uady.mx/ojs/index.php/ingenieria/article/view/80>. Acesso: 21/09/2021.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades@, 2021a. Disponível: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/petrolina/panorama>. Acesso: 07/12/2021.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades@, 2021b. Disponível: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/panorama>. Acesso: 07/12/2021.

Islam MT, Huda N, Abdullah AB, Saidur RA. 2018. 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.097>.

Joardder MUH, Halder PK, Rahim MA, Masud MH. 2017. Solar Pyrolysis. *Clean Energy for Sustainable Development* 213-23, doi: <http://doi.org/10.1016/b978-0-12-805423-9.00008-9>.

Lodi C. 2011. Perspectivas para a geração de energia elétrica no Brasil utilizando a tecnologia solar térmica concentrada. Dissertação (mestrado) UFRJ/COPPE/Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro.

Magacho IT, Silva GB, Castro GGP. 2019. Desenvolvimento de um motor stirling movido a energia solar. *Brazilian Journal of Development* 5(11):27296-27306, doi: <http://doi.org/10.34117/bjdv5n11-337>.

Martins FR, Abreu L, Pereira EB. 2012. Scenarios for solar thermal energy applications in Brazil. *Energy Policy*, Guildford 48:640-649, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.05.082>.

Mendes JF, Horta P. 2010. A produção de electricidade por via termosolar em centrais de concentração. *Renováveis Magazine* 1:30-3. Disponível: <https://repositorio.lneg.pt/handle/10400.9/1125>. Acesso: 21/09/2021.

NREL, 2019. Concentrating Solar Power Projects. Disponível em: <https://solarpaces.nrel.gov>. Acesso: 27/09/2021.

- Pigozzo Filho VC, Sá AB, Sousa SS, Passos JC. 2018. Projeto, construção e testes de um protótipo concentrador solar Fresnel linear para geração direta de vapor para processos industriais. Anais. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado. Disponível: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/399>. Acesso: 21/09/2021.
- Piña-Ortiz A, Hinojosa JF, Perez-Enciso RA, Maytorena VM, Estrada C, Pérez-Rábago CA, Calleja RA. 2018. Experimental analysis of a flat plate receiver for measurement of low thermal power of a central tower solar system. Aip Conference Proceedings 2033, 040031, doi: <http://doi.org/10.1063/1.5067067>.
- Ravi KK, Reddy KS. 2012. 4-E (energy-exergy-environmental-economic) analyses of line-focusing stand-alone concentrating solar power plants. International Journal of Low-Carbon Technologies 7(2):82-96, doi: <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts005>.
- Retorta FS, Küster KK, Aoki AR, Gazoli JR, Souza SP, Paschoalotto LAC, Franco AC. 2018. Estudo de alternativas tecnológicas visando nacionalização e metodologia para alocação de plantas termossolares concentradas no Brasil. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. Disponível: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/419/419>. Acesso: 11/12/2021.
- Reyes JJ, Zacarías A, Jiménez JA, Pineda J, Nieto M, Angeles RA. 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, Portugal. 375-381. Disponível: <http://repositorio.ineg.pt/handle/10400.9/3380>. Acesso: 21/09/2021.
- Schlecht M, Meyer R. 2012. Site selection and feasibility analysis for concentrating solar power (CSP) systems. Lovegrove K, Stein W. Concentrating solar power technology. Cambridge, UK: Woodhead.
- Silva AHM, Codeceira Neto A. 2019. Modelagem de uma Planta Heliotérmica CSP com armazenamento de calor e hibridização para Petrolina. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada 4(2):21-32, doi: <http://doi.org/10.25286/repa.v4i2.957>.
- Silva LRC, Vigoderis RB. 2021. Estudo da viabilidade para instalação de eletrogeradores termossolares no município de Garanhuns, Pernambuco. Journal Of Hyperspectral Remote Sensing 11(6):347-356, doi: <https://doi.org/10.29150/jhrs.v11.6.p347-356>.
- Souza LFL, Fraidenraich N, Tiba C, Gordon JM. 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 GV, Kumar SA, Ramakrishna G. 2018. Performance of cylindrical parabolic collector with automated tracking system. Applied Solar Energy 54(2):134-138, doi: <http://doi.org/10.3103/s0003701x18020135>.
- Tavakolpour AR, Zomorodian A, Golneshan AA. 2008. Simulation, construction and testing of a two-cylinder solar Stirling engine powered by a flat-plate solar collector without regenerator. Renewable Energy 33(1):77-87, doi: <http://doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.004>.
- Vieira LSR, Guimarães APC, Lisboa PA. 2018. Geração heliotérmica: estado da arte e experiência do cepel. Renováveis: Energias Complementares 25:44-51.
- 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 LA, Loomis J, Bhati B, Bierman DM, Wang EN, Chen G. 2015. Concentrating solar power. Chemical Reviews 115(23):12797-12838, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00397>.
- Yalçınkaya 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 AR. 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>.

Análise de viabilidade para implantação de um sistema eletrogerador heliotérmico no município de Petrolina, Pernambuco, com base em matriz esforço - impacto

Zare, Sh, Tavakolpour-Saleh AR. 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>.



Esta obra está licenciada com uma *Licença Creative Commons Atribuição Não-Comercial 4.0 Internacional*.