Latin American Journal of Energy Research - Lajer
periodicos.ufes.br/lajer

Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2024) v. 11, n. 2, p. 212–222
https://doi.org/10.21712/lajer.2024.v11.n2.p212-222

Uma comparação entre tecnologias de geração de energia solar fotovoltaica e heliotérmica

A comparison between photovoltaic and solar thermal power generation technologies

Thiago Farias dos Santos[1], Ana Julia Dal Forno[2,*]

[1] Professor Associado do curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Instituto Federal Catarinense – IFC campus Blumenau, SC, Brasil
[2] Professora Adjunta do Programa de Pós-graduação em Engenharia Têxtil, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, campus Blumenau, SC, Brasil
*Autor para correspondência, E-mail: ana.forno@ufsc.br

Received: 30 November 2024 | Accepted: 18 December 2024 | Published online: 26 December 2024

Resumo: Este artigo teve como objetivo comparar as tecnologias de geração de energia elétrica solar fotovoltaica (PV) e solar térmica concentrada (CSP), como critério preliminar de escolha deste tipo de fonte de geração de energia elétrica renovável. Foram apresentadas as particularidades, características técnicas e econômicas, formas de funcionamento e demais características de cada uma. Como forma de determinar em quais situações os sistemas PV e CSP apresentam maior viabilidade de implantação, foram realizadas análises da geração de eletricidade em cenários distintos, tanto atuais quanto futuros, fazendo-se uso da métrica do custo nivelado de eletricidade (LCOE), do fator de capacidade, da área necessária para instalação dentre outros. Os resultados obtidos demonstraram que as vantagens da geração PV são: o custo menor do LCOE, geração de energia com radiação direta e difusa, modularidade e simplicidade de instalação e geração de energia após sua instalação. Por outro lado, a tecnologia CSP possui como principais diferenciais, um maior fator de capacidade e consequente armazenamento de energia, a possibilidade de operação de forma híbrida. Assim, foi observado que, a escolha do tipo de tecnologia de geração de energia elétrica solar dependerá de diversos fatores além daqueles obtidos mediante a métrica do custo nivelado de eletricidade.
Palavras-chave: energia solar; custo nivelado de eletricidade; geração de energia; sustentabilidade.

***Abstract**: This article aimed to compare solar photovoltaic (PV) and concentrated solar thermal (CSP) technologies for generating electricity as a preliminary criterion for choosing this type of renewable energy source. The particularities, technical and economic characteristics, operating methods and other features of each were presented. In order to determine in which situations PV and CSP systems are more viable for implementation, analyses of electricity generation in different scenarios, both current and future, were carried out, using the levelized cost of electricity (LCOE) metric, the capacity factor, the area required for installation, among others. The results obtained demonstrated that the advantages of PV generation are: lower LCOE cost, generation of energy with direct and diffuse radiation, modularity and simplicity of installation and generation of energy after its installation. On the other hand, the main differentials of CSP technology are a higher capacity factor and consequent energy storage, and the possibility of hybrid operation. Thus, was observed that the choice of the type of solar power generation technology will depend on several factors in addition to those obtained using the levelized cost of electricity metric.*
Keywords: solar energy; levelized cost of electricity; power generation; sustainability.

1 Introdução

O constante crescimento populacional vem ocasionando o aumento da demanda por energia elétrica a nível mundial. Neste contexto, nos países em desenvolvimento, o consumo de energia continua a crescer, enquanto nos países desenvolvidos o consumo permanece elevado (Roni et al., 2019).

Atualmente, o suprimento da demanda energética mundial é realizado de forma majoritária por combustíveis de origens fósseis, fator este que ocasiona severos impactos ao meio ambiente, como por exemplo, o dióxido de carbono resultante da queima destes combustíveis (Goldemberg and Lucon, 2012).

Frente à disponibilidade finita e cada vez mais reduzida das fontes não renováveis (petróleo, carvão e o gás natural), bem como dos impactos ocasionados ao meio ambiente em razão da extração e utilização destes combustíveis, houve o aumento da utilização das fontes renováveis de energia como forma de amenizar os problemas ocasionados pela utilização dos combustíveis fósseis(Müller-Steinhagen, 2013).

Neste contexto, a grande disponibilidade de energia solar surge como uma das principais soluções para as limitações impostas pela utilização dos combustíveis fósseis, de modo que uma conversão inferior a 1% da disponibilidade solar seria suficiente para atender a demanda global de energia de uma forma não poluente e renovável (Awan et al., 2019).

A conversão da energia solar em energia elétrica é realizada por meio de duas tecnologias distintas: a solar térmica concentrada ou heliotérmica (CSP) e a tecnologia fotovoltaica (PV). A primeira faz uso do ciclo termodinâmico para realizar esta conversão, enquanto a tecnologia baseada em células fotovoltaicas converte diretamente a luz solar em energia elétrica (Desideri and Campana, 2014). Estas fontes de energia renováveis contribuíram de forma crescente na geração de energia elétrica ao longo dos anos, sendo que no ano de 2021, ambas as tecnologias foram responsáveis pela geração conjunta de 1.035.070,0 GWh de energia elétrica (IEA, 2022).

Diante desse contexto, este artigo teve como objetivo comparar as tecnologias de geração de energia elétrica solar fotovoltaica (PV) e solar térmica concentrada (CSP). A metodologia utilizada, baseou-se em uma revisão teórica na qual foram analisadas as características mais adequadas inerentes a cada tipo de tecnologia. Assim, a contribuição deste trabalho foi auxiliar na tomada de decisão quanto aos aspectos técnicos e econômicos, destacando os pontos favoráveis e desfavoráveis de cada uma destas tecnologias renováveis de geração de energia elétrica.

Após essa introdução, a seção 2 descreve o referencial teórico sobre o panorama energético mundial e as formas de geração de energia elétrica baseadas nas tecnologias solar fotovoltaica e solar térmica concentrada, respectivamente. A seção 3 apresenta os resultados da análise comparativa entre ambas as formas de geração de energia solar. Por fim, há as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 Panorama enérgico mundial

O crescimento populacional, aliado as questões relacionadas com a busca por melhores condições pessoais e materiais necessitam do incremento da disponibilidade de energia, como forma de suprir tais demandas. Desta forma, a produção, distribuição e consequente utilização de energia elétrica e combustíveis, tornam-se essenciais para a manutenção das atividades populacionais globais deste século (Galembeck, 2022).

Atualmente a matriz energética mundial é composta em sua maioria, de fontes de energia não renováveis, dentre as quais, o petróleo, o carvão e o gás natural figuram como os combustíveis fósseis mais utilizados, com participação majoritária de mais de 80% da matriz energética global. Já em relação as fontes de energia renováveis, estas possuem uma participação mais discreta na matriz energética mundial (14,7%), divididas entre as seguintes fontes: biomassa (9,5%), hidráulica (2,5%), e as denominadas outras (solar, eólica, geotérmica etc.) com 2,7% (IEA, 2023).

Em relação à geração de eletricidade, a matriz elétrica mundial também é baseada em fontes de energia não renováveis, onde o carvão, gás natural, petróleo (e derivados) e a energia nuclear, representam um percentual majoritário de 71,4% da geração total da energia elétrica do planeta. A geração de eletricidade oriunda de fontes renováveis tais como: hidráulica, eólica, solar fotovoltaica biomassa, solar térmica e geotérmica é mais discreta, conforme pode ser observado na Figura 1 (IEA, 2023).

Visto o atual contexto de predominância dos combustíveis fósseis na matriz elétrica mundial, as fontes de energias renováveis são alternativas de substituição das fontes de energia poluentes (não renováveis), sem proporcionar uma diminuição do crescimento econômico, pelo contrário, agregando alternativas para o crescimento, econômico, social e ambiental (Vieira, 2021).

Deste modo, as severas consequências climáticas e ambientais, adicionadas à realidade cada vez mais iminente da finitude dos recursos de origem fóssil, tornam as fontes de energia alternativas e renováveis, necessárias ao suprimento crescente da demanda por energia e consequentemente o futuro da economia e da vida da população mundial (Corrêa e Cário, 2022).

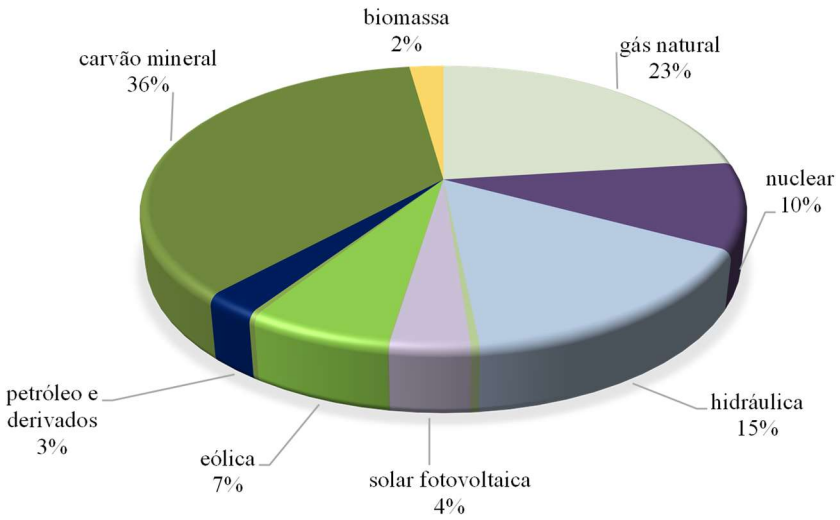

Figura 1 - Matriz elétrica mundial 2021. Fonte: IEA (2023).

No ano de 2023, o incremento global das fontes renováveis foi de aproximadamente 36%, alcançando 473 GW, o que representou um aumento de 25,7% comparado ao ano de 2022, o que mostra o grande potencial de investimentos em fontes renováveis de energia (REN21, 2024).

2.1 Geração de energia elétrica baseada na tecnologia fotovoltaica

Neste tipo particular de tecnologia, as células solares fotovoltaicas possuem a propriedade de converter diretamente a luz solar incidente na sua superfície em eletricidade. Esta conversão ocorre mediante a utilização de tecnologias que são baseadas em materiais do tipo semicondutores, tais como o silício cristalino (c-Si) e película fina (TF), ambos com atuação dominante em termos de utilização no mercado (Frontin et al., 2017).

A utilização deste tipo de tecnologia para a conversão da energia solar em eletricidade possui como exemplo, as seguintes vantagens: modularidade (potências na ordem de alguns miliwatts a megawatts), grau de confiabilidade elevado, manutenção reduzida e relativa simplicidade (Zomer, 2014). Demais características dos sistemas solares que fazem uso de módulos fotovoltaicos são: possibilidade de geração de energia elétrica de forma imediata após sua instalação, podem ser realocados em caso de necessidade, são silenciosos e estáticos (desprovidos de peças móveis) e possuem a possibilidade de instalação próximo ou até mesmo junto ao ponto de consumo (Urbanetz et al., 2011).

De acordo com Obeidat (2018), atualmente diferentes materiais são utilizados no desenvolvimento dos sistemas solares, porém espera-se que outros materiais sejam utilizados no desenvolvimento das células, módulos e em dispositivos de eletrônica de potência, objetivando uma maior eficiência e vida útil, aliados a custos reduzidos. Ainda, espera-se que até o ano de 2030, tecnologias comerciais como silício cristalino e película fina possam ser desenvolvidas para alcançar maiores eficiências e maiores expectativas de vida, como por exemplo, de quarenta anos para painéis fotovoltaicos.

O arranjo de uma planta fotovoltaica convencional com seus respectivos componentes é mostrado na Figura 2, onde é possível observar em mais detalhes o processo de conversão de energia solar em energia elétrica.

Diversos fatores podem ser destacados no que diz respeito ao incremento da utilização de sistemas baseados na tecnologia de células fotovoltaicas como por exemplo, os elevados preços das energias convencionais, a redução no valor de fabricação das células fotovoltaicas com o passar dos anos, bem como as questões referentes a conscientização populacional em relação ao fenômeno do aquecimento global e seus respectivos impactos ambientais (Zomer, 2014).

Em termos mundiais de capacidade cumulativa instalada, a geração solar fotovoltaica atingiu um valor de 1,6TW no final do ano de 2023, representando um aumento de 27% em relação ao ano de 2022 que foi de 1,18TW. Neste contexto, a China detém a liderança, seguida da União Europeia, dos Estados Unidos, Índia e Japão. Já nas américas, o mercado de energia fotovoltaica teve um crescimento acelerado no ano de 2023, onde nos Estados Unidos este valor foi em torno de 33,2GW, e o Brasil com 11,9 GW (Masson et al., 2024).

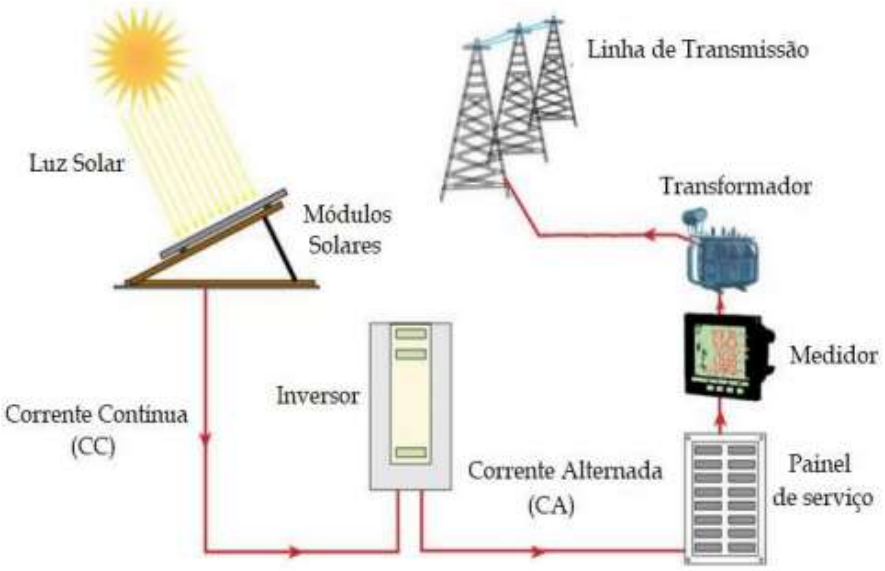

Figura 2 - Planta Fotovoltaica convencional. Fonte: Okafor et al. (2013).

O crescimento acelerado da capacidade instalada dos sistemas fotovoltaicos em países como China, Estados Unidos, Alemanha dentre outros, se deu principalmente em função da adoção de programas de incentivos a utilização de fontes renováveis de energia, aliadas a questões ambientais, energéticas, sociais e político-econômicas (Raimo, 2018).

2.2 Geração de energia elétrica baseada na tecnologia solar térmica concentrada

Na tecnologia heliotérmica ou solar térmica concentrada, conhecida internacionalmente como *Concentrating Solar Power,* a radiação solar é inicialmente concentrada e convertida em calor, para posteriormente ser utilizada para a geração de energia elétrica (Ju et al., 2017). Nestes sistemas, a utilização dos concentradores solares (compostos por espelhos) redirecionam os raios solares a um concentrador que gera calor em altas temperaturas, ocasionando o acionamento de turbinas a vapor, as quais eram tradicionalmente acionados por combustíveis fósseis (Kalogirou, 2013).

As tecnologias de plantas solares térmicas concentradas existentes e utilizadas atualmente, são as seguintes: concentrador Cilindro Parabólico, Torre solar ou Receptor Central, Refletores Lineares de Fresnel e Disco Parabólico. Em termos de concentração da radiação solar, estas podem ser pontuais ou lineares ao longo de um tubo, sendo o receptor classificado em estacionário ou móvel (Soria, 2011).

Dentre as quatro tecnologias consideradas, existe o predomínio do uso do concentrador cilindro-parabólico, com 72,4% de toda a capacidade instalada deste tipo de geração, seguido da tecnologia torre central com 22% da capacidade instalada (Alami et al., 2023). A forma de geração solar baseada em concentrador cilindro-parabólico e torre solar pode ser observada na Figura 3.

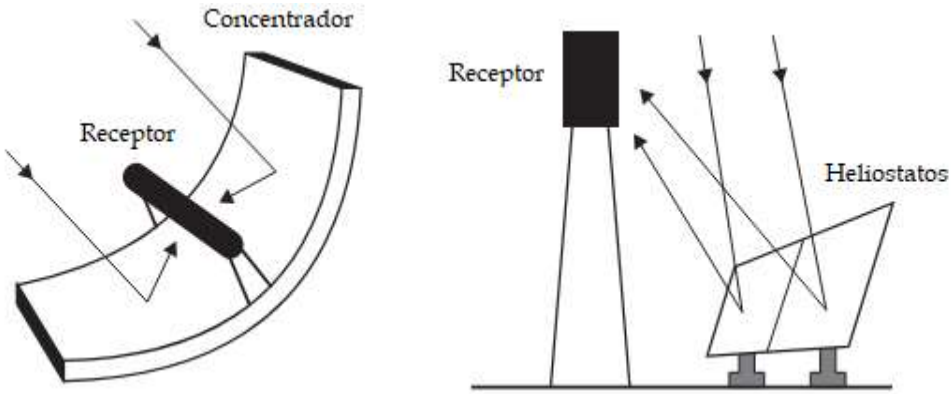

Figura 3 - Tecnologias CSP predominantes atualmente: (a) Concentrador cilindro-parabólico; (b) Torre solar. Fonte: Breeze (2019).

A tecnologia do tipo concentrador cilindro-parabólico, mostrada na Figura 4, é composta por coletores solares de material reflexivo em forma de parábola, que convergem os raios solares refletidos à um receptor

tubular de elevada capacidade de absorção e reduzida emissão térmica. Desta forma, um fluído de trabalho (sais fundidos ou óleo sintético) é aquecido, podendo ser armazenado para utilização posterior ou então conduzido a um trocador de calor, onde o vapor gerado irá acionar uma turbina e assim gerar energia elétrica (Maranhão, 2014).

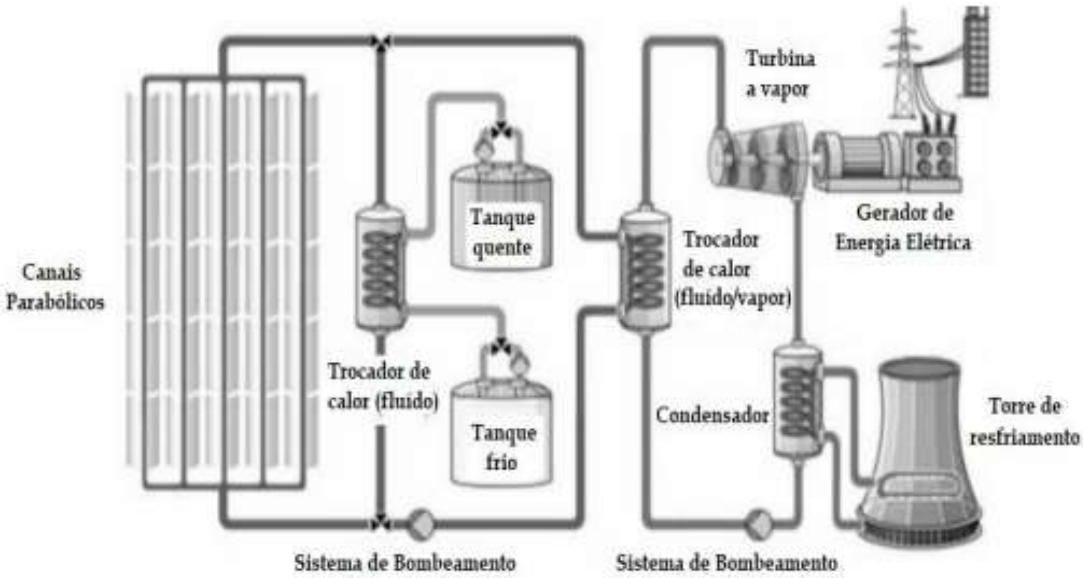

Figura 4 - Planta CSP do tipo coletor cilindro-parabólico com armazenamento. Fonte: Faraz (2012).

Já o sistema baseado na tecnologia torre solar, esquematizado na Figura 5, utiliza um campo circular ou semicircular de espelhos de grandes dimensões (denominados heliostatos), que concentram a radiação solar em um receptor central localizado no topo de uma torre. Deste modo, um fluído depositado em um tanque frio irá atingir altas temperaturas, passando por um tanque de armazenamento térmico e posteriormente para um trocador de calor, gerando vapores que irão acionar uma turbina conectada a um gerador de energia elétrica (Maranhão, 2014).

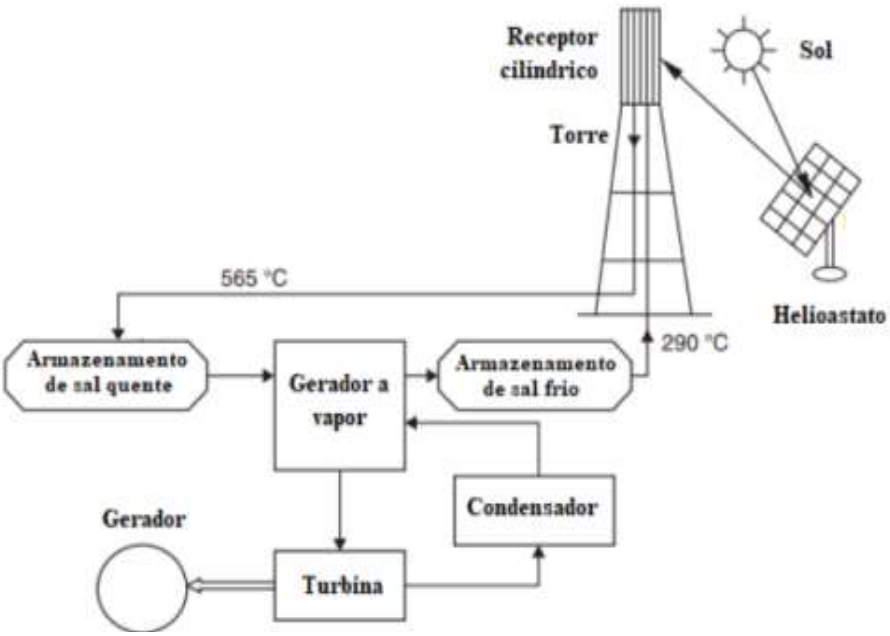

Figura 5 - Planta CSP baseada na tecnologia torre solar. Fonte: Kalogirou (2013).

Atualmente, as plantas CSP apresentam uma capacidade operacional instalada mundial de 8812 MW, onde a Espanha lidera em termos de participação com 28,58%, seguido dos Estados Unidos (18,77%). Países como China, Marrocos, África do Sul, Oriente Médio e Norte da África, Índia, Chile, Europa, México, Tailândia, Austrália e Canadá completam o restante da capacidade instalada no mundo em relação a este tipo de tecnologia de geração de energia elétrica (Solar Paces, 2024).

3 Resultados da análise comparativa entre as tecnologias de geração de energia elétrica solar fotovoltaica e solar térmica concentrada

Em relação aos sistemas de geração de energia elétrica fotovoltaicos (PV), os mesmos possuem como principais vantagens: baixo impacto ambiental, manutenção reduzida, possibilidade de instalação junto ao ponto de consumo, capacidade de modularidade (ampliação ou redução da quantidade de módulos, conforme necessidade) e possibilidade de reinstalação em outro local (Urbanetz et al., 2011). Outros pontos de viabilidade destes sistemas são: possibilidade de geração de energia através da radiação solar tanto direta quanto difusa, geração de energia elétrica imediatamente após a sua instalação e a possibilidade de funcionamento de forma isolada sem conexão à rede elétrica (sistemas *off-grid*) (Urbanetz et al., 2011).

Já as usinas solares térmicas concentradas (CSP) ou heliotérmicas, possuem as seguintes vantagens: possibilidade de armazenamento térmico (capacidade de operação em período de indisponibilidade solar) e o menor impacto na geração de energia devido a eventuais variações de incidência solar (Nogueira, 2017). Uma característica importante deste tipo de tecnologia é a possibilidade de armazenamento de energia sob forma de calor, aumentando assim o seu fator de capacidade (FC) frente às usinas fotovoltaicas, com valores entre 0,1 a 0,25. A equação referente ao FC é apresentada na Eq. (1) (Nogueira, 2017).

$$FC = \frac{Geração\ Efetiva\ (kWh)}{Potência\ Nominal(kW) * Horas(h)} \tag{1}$$

De forma adicional, os sistemas solares térmicos concentrados permitem uma maior flexibilidade no que diz respeito ao consumo de energia elétrica em momentos que esta possui menor valor, e de gerar nos períodos em que é mais cara, auxiliando no pagamento de seus custos, já que estes sistemas apresentam um elevado valor de implementação (Nogueira, 2017).

Outra forma de realizar a comparação das diferentes tecnologias de geração de energia solar, assim como avaliar a viabilidade econômica das mesmas, é dada por meio do custo nivelado de eletricidade ou internacionalmente conhecido como LCOE (*Levelized Cost of Electricity*). Essa métrica consiste em comparar todos os custos incorridos tais como: investimentos realizados, operação e manutenção, combustível utilizado no valor presente, além de toda a energia gerada ao longo da vida útil da usina. A grandeza resultante relacionada ao LCOE é expressa geralmente em USD/kWh ou EUR/kWh (Castro, 2015). Uma expressão analítica pode ser utilizada na projeção do custo nivelado de eletricidade para as tecnologias solares de geração de energia elétrica, conforme mostra a Eq. (2) (Parrado et al., 2016).

$$LCOE(t) = \left(\frac{C(t) + L + \sum_{i=1}^{T} \left[\frac{C(t)(O\&M + I)}{(1+d)^i} \right]}{\sum_{i=1}^{T} \left[\frac{STF\eta(1-DR)^i}{(1+d)^i} \right]} \right) \tag{2}$$

sendo: “C(t)” o custo total de instalação do sistema ($/W); “L” o custo do terreno ($/W); “O&M” os custos de operação e manutenção (%); “I” os custos de seguro (%); “S” os recursos solares (kwh/m^2/ano); “TF” o fator de rastreamento (%); “η” o fator de desempenho (m^2/W); “DR” a taxa de degradação (%); “d” a taxa de desconto (%); e “T” a vida útil do sistema em anos.

Em relação à expressão analítica do LCOE, a variável 'S' (que representa os recursos solares disponíveis em kWh/m²/ano) e a variável 'd' (taxa de desconto, equivalente à taxa de juros que leva em consideração o valor temporal do dinheiro e o risco de investimento) são as mais expressivas no que diz respeito a análise de sensibilidade do LCOE em relação a uma variação paramétrica tanto para sistemas fotovoltaicos, quanto para sistemas térmicos concentrados (Hernández-Moro e Martínez-Duart, 2013).O comportamento do custo nivelado de eletricidade de usinas PV e CSP em centavos de dólar por Kwh, é mostrado na Figura 6, na qual foram considerados dois cenários distintos de recursos solar (*Blue Map e Roadmap*) para o ano de 2010 e a previsão para 2050 (Hernández-Moro e Martínez-Duart, 2013).

É possível observar na Figura 6 um maior intervalo de valores de recurso solar nos sistemas PV frente aos sistemas CSP em função da possibilidade de geração de energia, a partir de irradiação direta e difusa nos sistemas fotovoltaicos. Porém, percebe-se, que à medida em que ocorre o incremento do recurso solar, os LCOEs dos sistemas fotovoltaicos diminuem em uma taxa inferior do que os LCOEs dos sistemas térmicos concentrados, em razão da redução na eficiência das células solares dos painéis fotovoltaicos com a elevação da temperatura (Santos et al., 2021).

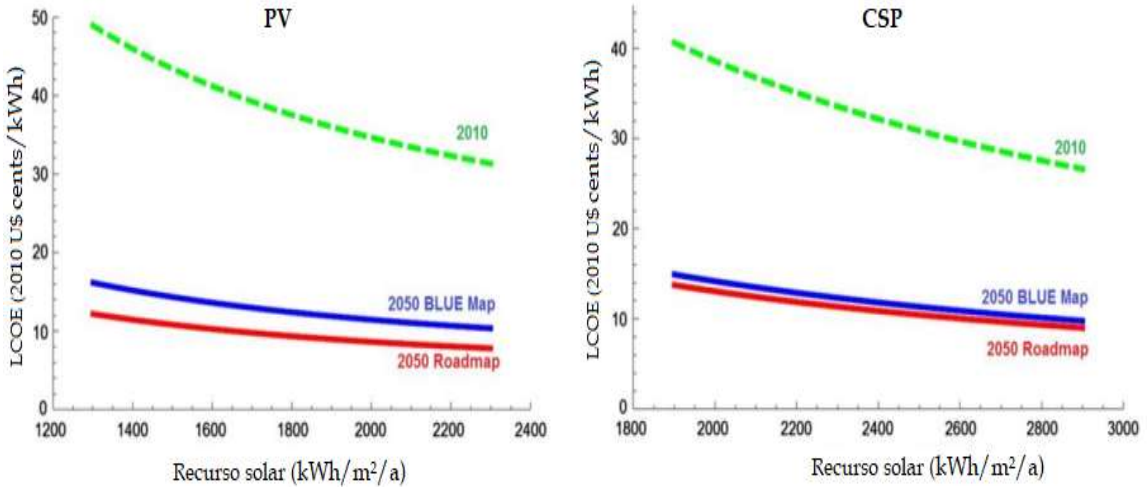

Figura 6 - Comportamento do LCOE em função do recurso solar para sistemas PV (a) e CSP (b) para diferentes cenários (*BLUE Map e Roadmap*). Fonte: Adaptado de Hernández-Moro e Martínez-Duart (2013).

A comparação do custo nivelado de eletricidade entre usinas solares CSP e PV foram simuladas considerando ambas com capacidade de armazenamento de energia de nove horas mediante a utilização de sistemas térmico no sistema CSP e baterias de *Li-ion* para o sistema PV (World Bank, 2021) . Foi observado que para simulações baseadas em curva de experiência e em projeções, que a tecnologia solar térmica concentrada foi mais competitiva, apresentando um menor valor do custo nivelado de eletricidade, conforme pode ser observado na Figura 7.

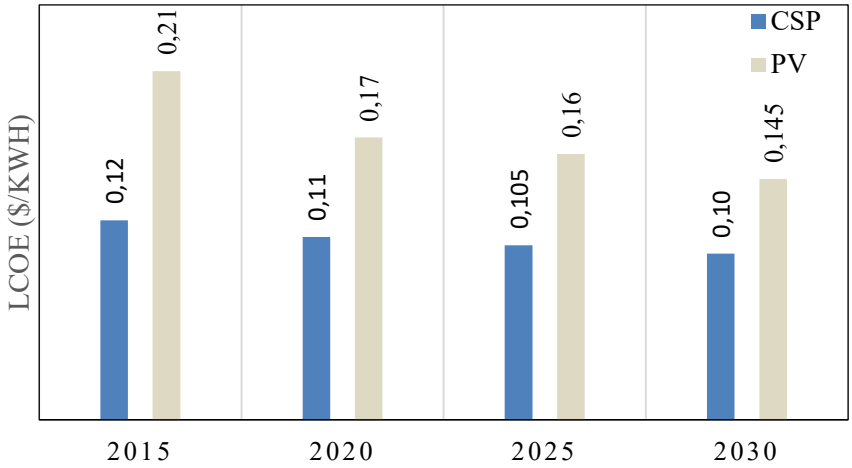

Figura 7- Comportamento do LCOE para sistemas CSP e PV. Fonte: Adaptado de World Bank (2021).

Convém observar que nas simulações realizadas por (World Bank, 2021) os sistemas fotovoltaicos com baterias de maior vida útil (15 anos) apresentaram custos nivelados de eletricidade menores dos que as baterias de menor tempo duração (10 anos) nos cenários analisados. Já nas previsões europeias, com o passar dos anos analisados e previstos, no horizonte até 2040, ambos os valores do LCOE tenderão a cair, na qual a tecnologia PV continuará tendo LCOE inferior ao do CSP (Kost et al., 2024).

Uma análise técnico-econômica da utilização dos sistemas coletores cilindro-parabólico e solar fotovoltaico (PV) foi realizada para quarenta cidades da Arábia Saudita que, ao considerar as duas plantas com nove horas de armazenamento (solar e baterias), o custo nivelado de eletricidade foi maior na tecnologia PV (Shakeel e Mokheimer, 2022).

Os autores (Roni et al., 2019) fizeram estudos comparativos em quatro localidades da região de Bangadlesh, na qual observou-se que o menor valor do LCOE em termos da capacidade da planta em MW, foi justamente para os sistemas fotovoltaicos. Porém, o valor do fator de capacidade apresentado pelo sistema PV foi inferior ao dos sistemas baseados nas tecnologias CSP do tipo torre solar e coletor cilindro parabólico.

O custo estimado do LCOE para sistemas de geração de energia elétrica do tipo CSP e PV na Europa, Estados Unidos e China, apresentaram um valor mais elevado, fazendo-se uso do sistema de geração

heliotérmico, quando comparada a utilização da tecnologia de geração de energia elétrica fotovoltaica (Răboacă et al., 2019).

Em relação à capacidade de geração instalada acumulada prevista até o ano de 2050 (partindo do ano de 2010), dois cenários foram projetados (*Blue Map e Roadmap*), onde o primeiro projeta os sistemas PV e CSP com participações nos valores da produção anual global de energia elétrica com valores de 6% e 5% respectivamente, enquanto para o segundo cenário, o valor do percentual projetado ficou em torno de 11% para ambas as tecnologias (Parrado et al., 2016).

Outra comparação do custo nivelado de eletricidade para sistemas CSP e PV foi realizada por (Baharum et al., 2018) para o ano de 2020, sendo que o LCOE apresentou um valor 10% superior quando comparado ao sistema utilizando planta fotovoltaicas. Quanto à instalação dos sistemas de geração de energia solar CSP e PV, também é preciso considerar a disponibilidade de área do terreno, visto a grande dimensão que tais sistemas podem atingir, de acordo com a capacidade de geração. Assim, a área necessária, de acordo com a capacidade instalada de geração de sistemas CSP em relação aos fotovoltaicos é mostrada na Figura 8, na qual é possível observar que quão maior for a capacidade instalada, maior será a necessidade de área disponível para a instalação da usina solar (Roni et al., 2019).

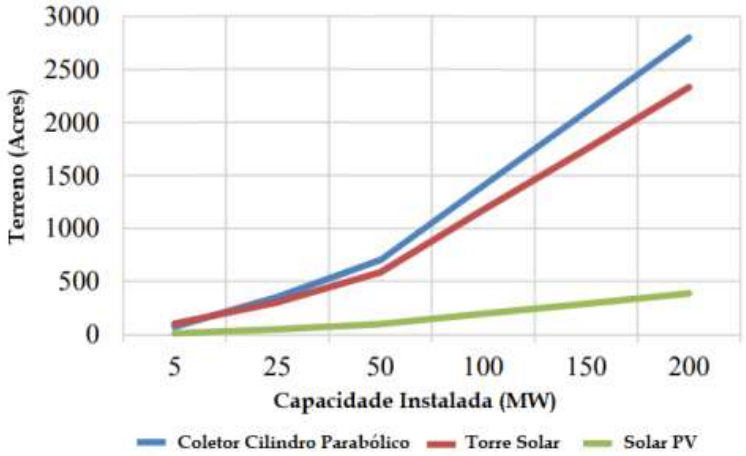

Figura 8 - Área em função da capacidade instalada para usinas solares. Fonte: Adaptado de Roni et al. (2019).

É possível perceber na Figura 8 que os sistemas CSP necessitam de maiores áreas de acordo com a capacidade instalada, visto a grande quantidade de coletores parabólicos, heliostatos e demais estruturas necessárias (tanques de armazenamento, turbina, gerador) ao funcionamento deste tipo de tecnologia. Já para as usinas fotovoltaicas a necessidade de área (terreno) é consideravelmente inferior do que os sistemas CSP, onde é possível observar que para a mesma capacidade instalada (200MW), a área necessária é quase sete vezes menor do que para o sistema CSP do tipo coletor cilindro parabólico (Roni et al., 2019).

Uma análise comparativa entre plantas CSP do tipo coletor cilindro parabólico e fotovoltaico, ambos com potência de 3MW, foi realizada por (Desideri e Campana, 2014) nas cidades de Gela no sul da Itália e Luxor no Egito. Para a cidade italiana e considerando a mesma potência, o sistema CSP apresentou geração de energia anual superior ao sistema PV (40,7 GWh contra 10,6 GWh, respectivamente), porém em contrapartida, o sistema fotovoltaico, apresentou um melhor aproveitamento em termos da área total ocupada com um percentual de 5,7 % frente a 5,3 % do sistema térmico concentrado. Outro ponto a ser observado, é que para ambos os sistemas ocupando a mesma área (56,8 hectares), a usina fotovoltaica obteve resultados superiores no que diz respeito tanto a geração de energia quanto o aproveitamento da área ocupada, ou seja, com valores de 70,5 GWh e 5,6 % comparados à 40,7 GWh e 5,3 % do sistema CSP do tipo coletor cilindro parabólico. Este resultado é proveniente da capacidade de aproveitamento da radiação difusa dos painéis fotovoltaicos, característica esta não presente nos sistemas solares térmicos concentrados (Santos et al, 2021).

Já para a cidade de Luxor, considerando a equivalência entre os valores de potência de saída das usinas, o sistema CSP conseguir um valor de 28,1GWh de energia gerada (com um aproveitamento da área total ocupada de 8%), enquanto a usina fotovoltaica conseguiu gerar 6,8 GWh com um aproveitamento de área de 5,9%. De mesma forma, foi considerada o mesmo valor de área ocupada para ambos os sistemas (15,4 hectares), onde o sistema CSP apresentou valores de geração de 28,1 GWh e área ocupada de 8%, quando comparado a uma geração de 23,6 GWh e área ocupada de 5,8% na geração PV. Neste caso, os valores superiores de geração dos sistemas CSP ocorreram em razão da maior taxa de irradiação solar direta em relação a irradiação total, bem como em função da maior média anual de temperatura quando comparada a

cidade de Gela na Itália, pois o desempenho dos painéis fotovoltaicos decresce com o aumento da temperatura (Desideri and Campana, 2014).

No trabalho de Baharum et al. (2018) foi observado que a área total necessária para uma planta solar fotovoltaica foi quase 13% superior a área necessária para abrigar uma planta solar do com a tecnologia CSP, no que diz respeito a mesma quantidade de geração de potência em (GWh).

Em seu artigo Bayeh e Moubayed (2014) realizaram a comparação de diferentes características em relação as tecnologias de geração de energia solar fotovoltaica (PV) e torre central, apresentando as vantagens e desvantagens de cada uma. Foi observado, que dentre os pontos analisados, a geração solar fotovoltaica apresentou mais vantagens quando comparada a geração de energia elétrica com a utilização da tecnologia Torre central.

Outro aspecto relevante é relacionado às perdas óticas referentes a densidade gravimétrica de sujidade, onde para a mesma quantidade de poeira, foram observadas perdas por sujidade entre 8 a 14 vezes superiores na tecnologia CSP quando comparadas aos sistemas PV (Bellmann et al., 2020).

4 Conclusões

Este artigo apresentou um estudo comparativo com base em uma revisão bibliográfica das tecnologias de geração de energia elétrica solar fotovoltaica (PV) e solar térmica concentrada (CSP). Foram considerados aspectos de ordem técnica e econômica referentes a instalação e operação destas usinas geradoras de eletricidade tanto em cenários atuais, bem como para projeções futuras.

Com base nos dados dos estudos apresentados, foi possível verificar que mesmo possuindo o sol como fonte primária de energia, estas usinas possuem características e comportamentos diferentes, as quais podem ser fundamentais na escolha da tecnologia de geração de energia elétrica renovável a ser utilizada.

Considerando os sistemas fotovoltaicos (PV), estes apresentam alguns pontos favoráveis tais como: a menor quantidade de área necessária para sua instalação em função da potência instalada, capacidade de instalação próximo aos pontos de consumo, modularidade, absorção da radiação direta e difusa, e a não dependência de água para o seu funcionamento (como ocorre nos sistemas CSP).

Já os sistemas solares térmico concentrados (CSP) ou heliotérmicos, apresentam como principal vantagem, a capacidade de armazenamento de energia sob a forma térmica (possibilitando a posterior utilização desta energia em períodos desprovidos de recurso solar). Esta característica de armazenamento proporciona um maior fator de capacidade comparado aos sistemas fotovoltaicos. Outra característica é a possibilidade de operação híbrida com outras fontes de calor, bem como, a não alteração de sua eficiência com o aumento da temperatura, como ocorre nos painéis solares fotovoltaicos.

Em relação ao custo nivelado de eletricidade, foi possível observar que o comportamento deste é dependente de diversas variáveis, como por exemplo, o recurso solar disponível, a vida útil do sistema, os custos de operação e manutenção, dentre outros. Assim com base nas curvas de previsão desta métrica para ambos os sistemas (PV e CSP), foi possível observar que dentro de um horizonte de 20 anos (2020 - 2040) o valor do custo nivelado de eletricidade das usinas fotovoltaicas continuará sendo inferior ao das usinas solares térmicas concentradas providas de armazenamento. Foi inclusive visto que o LCOE dos sistemas PV é inferior ao das demais usinas consideradas, tais como a solar com alocação em telhados e eólicas.

O único cenário em que o valor do LCOE dos sistemas PV se apresentou superior ao dos sistemas CSP, foi o considerando ambos os sistemas com armazenamento de nove horas (CSP com armazenamento térmico e PV com baterias). Tal comportamento se dá justamente pelas características de armazenamento (custos das baterias) dos sistemas PV.

Conforme pode ser visto, a escolha dentre as tecnologias de geração de energia solar analisadas não irá depender somente do custo nivelado de eletricidade, mas também de fatores adicionais como por exemplo, a disponibilidade da área de instalação da usina, a localização perto ou distante do centro de consumo, a necessidade ou não de recurso hídrico, a demanda a suprida dentre outros, os quais devem ser levados em consideração na análise da tomada de decisão da tecnologia de geração de energia elétrica solar renovável a ser utilizada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e a FAPESC (Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina).

Referências

Alami, A.H., Olabi, A.G., Mdallal, A., Rezk, A., Radwan, A., Rahman, S.M.A., Shah, S.K., Abdelkareem, M.A., 2023. Concentrating solar power (CSP) technologies: Status and analysis. International Journal of Thermofluids 18, 100340. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100340

Awan, A.B., Zubair, M., Praveen, R.P., Bhatti, A.R., 2019. Design and comparative analysis of photovoltaic and parabolic trough based CSP plants. Solar Energy 183, 551–565. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.037

Baharum, F., Hanif Hassan, M., Dzulkarnaen Sudirman, M., Nasrun Mohd Nawi, M., Halipah Ibrahim, S., 2018. A Comparative Study of Levelized Cost of Electricity Between Photovoltaic and Concentrated Solar Powered Power Plants in Malaysia. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences Journal homepage 50, 134–145.

Bayeh, C.Z., Moubayed, N., 2014. Comparison between PV farms, solar chimneys and CSP towers in Lebanon: Influence of temperature and solar irradiance on the output power, in: International Conference on Renewable Energies for Developing Countries 2014. IEEE, pp. 211–216. https://doi.org/10.1109/REDEC.2014.7038558

Bellmann, P., Wolfertstetter, F., Conceição, R., Silva, H.G., 2020. Comparative modeling of optical soiling losses for CSP and PV energy systems. Solar Energy 197, 229–237. https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.045

Breeze, P., 2019. Solar Power, in: Power Generation Technologies. Elsevier, pp. 293–321. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102631-1.00013-4

Castro, G.M., 2015. Avaliação do valor da energia proveniente de usinas heliotérmicas com armazenamento no âmbito do sistema interligado nacional. UFRJ, Rio de Janeiro.

Corrêa, L., Cário, S., 2022. O carbon lock-in e as energias eólica e solar fotovoltaica no Brasil no século XXI. A Economia em Revista - AERE 30. https://doi.org/10.4025/econrev.v30i1.59587

Desideri, U., Campana, P.E., 2014. Analysis and comparison between a concentrating solar and a photovoltaic power plant. Appl Energy 113, 422–433. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.046

Faraz, T., 2012. Benefits of Concentrating Solar Power over Solar Photovoltaic for Power Generation in Bangladesh, in: IEEE (Ed.), 2nd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology.

Frontin, S.O., Fonseca, A., Gilmanova, A., Ardito, A., Carvalho, D.P., Gori, G., Gabetta, G., Buiatti, G.M., 2017. Usina Fotovoltaica Jaíba Solar: planejamento e engenharia. USP, São Paulo.

Galembeck, F., 2022. Energia: resolver problemas, explorar: demandas atuais de aumento na produção de energia de fontes renováveis criam grandes oportunidades para o Brasil. Cienc Cult 74. https://doi.org/10.5935/2317-6660.20220059

Goldemberg, J., Lucon, O., 2012. Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento, 3 ed. ed. USP, São Paulo.

Hernández-Moro, J., Martínez-Duart, J.M., 2013. Analytical model for solar PV and CSP electricity costs: Present LCOE values and their future evolution. Renewable and Sustainable Energy Reviews 20, 119–132. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.082

IEA, 2022. Snapshot of Global PV Markets - 2022. International Energy Agency.

Ju, X., Xu, C., Hu, Y., Han, X., Wei, G., Du, X., 2017. A review on the development of photovoltaic/concentrated solar power (PV-CSP) hybrid systems. Solar Energy Materials and Solar Cells 161, 305–327. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.12.004

Kalogirou, S.A., 2013. Solar Energy Engineering. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374501-9.X0001-5

Kost, C., Müller, P., Sepúlveda Schweiger, J., Fluri, V., Thomsen, J., 2024. Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies.

Maranhão, I.M., 2014. Estudo sobre a tecnologia heliotérmica e sua viabilidade no Brasil. (Trabalho de Comclusão de Curso). UNB, Brasilia.

Masson, G., Jäger-Waldau, A., Kaizuka, I., Lindahl, J., Donoso, J., de l'Epine, M., 2024. A Snapshot of the Global PV Market, in: 2024 IEEE 52nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). IEEE, pp. 0566–0568. https://doi.org/10.1109/PVSC57443.2024.10749131

Müller-Steinhagen, H., 2013. Concentrating solar thermal power. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 371, 20110433. https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0433

Nogueira, R.M., 2017. Viabilidade econômica da energia heliotérmica em Santa Catarina. (Trabalho de Conclusão de Curso). UFSC, Florianópolis.

Obeidat, F., 2018. A comprehensive review of future photovoltaic systems. Solar Energy 163, 545–551. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.050

Okafor, Kennedy Chinedu, Onwusuru, Ijeoma Madonna, Okafor, K C, Onwusuru, I M, Okoro, I.C., Onwusuru, C.O., 2013. Solar Satellite: A Green Energy Infrastructure for Power Challenged Environments, a Case for Solar Cell I-V Behaviour, African Journal of Computing & ICT.

Parrado, C., Girard, A., Simon, F., Fuentealba, E., 2016. 2050 LCOE (Levelized Cost of Energy) projection for a hybrid PV (photovoltaic)-CSP (concentrated solar power) plant in the Atacama Desert, Chile. Energy 94, 422–430. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.015

Răboacă, M.S., Badea, G., Enache, A., Filote, C., Răsoi, G., Rata, M., Lavric, A., Felseghi, R.-A., 2019. Concentrating Solar Power Technologies. Energies (Basel) 12, 1048. https://doi.org/10.3390/en12061048

Raimo, P.A., 2018. A disseminação dos sistemas fotovoltaicos e a qualificação profissional. USP, São Paulo.

REN21, 2024. Renewables 2024 global status report. Paris.

Roni, Md.M., Hoque, I.U., Ahmed, T., 2019. Comparative Study of Levelized Cost of Electricity (LCOE) for Concentrating Solar Power (CSP) and Photovoltaic (PV) Plant in the Southeastern Region of Bangladesh, in: 2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE). IEEE, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/ECACE.2019.8679173

Santos, T.F. dos, Soares, M.V., Junior, A.C., 2021. Análise comparativa entre tecnologias de geração de energia elétrica solar fotovoltaica e heliotérmica. . Disciplina de Energias Renováveis e Alternativas.

Shakeel, M.R., Mokheimer, E.M.A., 2022. A techno-economic evaluation of utility scale solar power generation. Energy 261, 125170. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125170

Solar Paces, 2024. CSP Projects Around the World [WWW Document]. https://www.solarpaces.org/worldwide-csp/csp-projects-around-the-world/.

Soria, R., 2011. Cenários de geração de eletricidade a partir de geradores heliotérmicos no Brasil: a influência do armazenamento de calor e da hibridização. UFRJ, Rio de Janeiro.

Urbanetz, J., Zomer, C.D., Rüther, R., 2011. Compromises between form and function in grid-connected, building-integrated photovoltaics (BIPV) at low-latitude sites. Build Environ 46, 2107–2113. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.024

Vieira, A.C.F., 2021. Energias renováveis e sua eficiência na nova economia energética no Brasil. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade 8, 211–223. https://doi.org/10.21438/rbgas(2021)081813

World Bank, 2021. Concentrating Solar Power: Clean Power on Demand 24/7. Washington DC.

Zomer, C.D., 2014. Método de estimativa da influência do sombreamento parcial na geração energética de sistemas solares fotovoltaicos integrados em edificações. UFSC, Florianópolis.