

USO DA ENERGIA TERMOSSOLAR NO BRASIL: PANORAMA ATUAL E POTENCIAL DE DESENVOLVIMENTO

Fernando Gonçalves de Souza – fernando.souza@labtucal.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Tubos de Calor - LABTUCAL

Nelson Yurako Londoño Pabón

Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Tubos de Calor - LABTUCAL

Nicolas Rodio

Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Tubos de Calor - LABTUCAL

Larissa Krambeck

Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Tubos de Calor - LABTUCAL

Rodrigo Santos Costa

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia – LABREN

André Rodrigues Gonçalves

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia – LABREN

Marcia Barbosa Henriques Mantelli

Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Tubos de Calor - LABTUCAL

Resumo. *O presente trabalho trata do potencial brasileiro de fornecer, a partir de energia heliotérmica, energia elétrica. Na tecnologia heliotérmica, também chamada de termossolar ou solar concentrada, a irradiação solar aquece um fluido de trabalho o qual, por sua vez, alimenta uma turbina de geração de energia elétrica. Nesse texto é descrito a tecnologia empregada pelas usinas solares CSP (Concentrated Solar Power), assim como, faz-se uma análise das matrizes de geração de energia elétrica por CSP no mundo, na Hispano América e no Brasil. No mundo, da energia elétrica total gerada em 2020, 0,1% foi produzida através da tecnologia heliotérmica. Na Hispano América os principais países que empregam usinas CSPs em escala industrial são Chile e México. Já o Brasil apresenta um grande potencial de exploração desta fonte de energia, tendo em vista os elevados níveis de irradiação solar incidente quando comparados com outros países onde a tecnologia CSP tem sido implantada. A maior parte do território brasileiro possui valores de irradiação direta normal superiores a $1460 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$, o que é similar ou superior aos valores de irradiação usuais encontrados em diversas usinas em operação ao redor do mundo. Portanto, é factível teorizar que todo o território nacional possui potencial para usufruir dessa aplicação, principalmente às regiões que não fazem parte do sistema interligado nacional (SIN).*

Palavras-chave: *Energia solar, Energia termossolar, Energia heliotérmica*

1. INTRODUÇÃO

O constante crescimento da população e o consumo elevado de energia elétrica tem levado a humanidade a uma incessante procura de novas fontes de energia, principalmente as renováveis. No mundo, energia elétrica “limpa” tem sido produzida a partir de fontes como a hidráulica, a eólica, e nos últimos anos, com forte destaque a energia solar, foco do presente trabalho.

No Brasil, a energia solar ainda possui uma contribuição modesta na produção de energia elétrica para o Sistema Interligado Nacional (SIN), apesar da sua abundância em quase todo o território nacional. Segundo o SIGA (Sistema de Informações de Geração da ANEEL), mesmo com o constante aumento da energia gerada a partir desta fonte, este setor responde por aproximadamente 5,37% da matriz elétrica brasileira, ver Fig. 1. O SIGA contabiliza como energia solar unicamente a produção das usinas fotovoltaicas (UFV), pois a produção de energia elétrica heliotérmica brasileira, ainda hoje, se encontra em fase de pesquisa e desenvolvimento. Também não é contabilizada a geração de energia elétrica distribuída, em casas, comércios, indústrias e estabelecimentos rurais, onde a energia solar fotovoltaica vem crescendo de maneira acentuada, superando os 17 GW de capacidade instalada em 2023 (EPE, 2023a).

O cenário brasileiro atual evidencia que 83,8% da potência elétrica gerada pelas usinas em operação possuem origem em fontes renováveis, sendo a fonte hídrica a responsável por mais da metade da geração nacional (ANEEL, 2023). A rede de transmissão de energia elétrica no Brasil é uma das barreiras para o avanço da geração solar, sendo deficiente em locais remotos, e obrigando o país a comprar energia de países vizinhos.

O Brasil possui um potencial ainda pouco explorado no uso da energia solar, principalmente quando comparado com países como a Alemanha, que recebe 40% menos irradiação do que o lugar menos ensolarado do Brasil, mas cuja energia solar representa cerca de 12,4% do total da sua matriz energética (Moreira Jr.; Souza, 2020). A integração desta

fonte à matriz elétrica nacional ainda apresenta desafios devido a sua intermitência. Neste ponto a contribuição da energia heliotérmica pode ser significativa, prestando serviços auxiliares ao SIN através e sua capacidade de regulação e armazenamento de energia, absorvendo parte da intermitência climática.

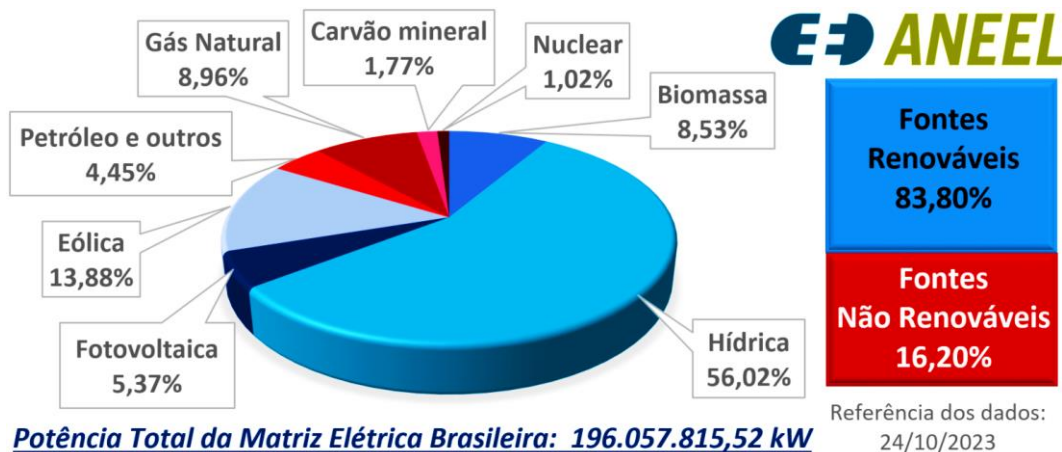


Figura 1 – Matriz elétrica Brasileira (Adaptado de: ANEEL, 2023).

Além disso, com relação às usinas heliotérmicas no Brasil, a falta de políticas públicas que deem suporte a novos empreendimentos desestimula os investimentos e impede a expansão desta tecnologia. Existem algumas regulamentações a nível estadual e municipal, porém sem padronização de critérios e normas para a implantação de novos empreendimentos heliotérmicos. Outro fator que prejudica a adoção desta tecnologia no país é a alta variabilidade de nuvens típica de atmosferas tropicais, que afeta o desempenho termodinâmico destas usinas (Luiz *et al.*, 2018).

Deste modo, o presente trabalho tem por objetivo apresentar a tecnologia utilizada na geração de energia termossolar, trazer uma visão global do aproveitamento dessa fonte energética, assim como evidenciar o potencial brasileiro em todo o território nacional, dando ênfase às regiões que não fazem parte do sistema interligado nacional (SIN).

2. TECNOLOGIAS CSP

A energia heliotérmica, também denominada por energia solar térmica ou energia solar concentrada ou, do inglês, *Concentrated Solar Power* (CSP) é uma tecnologia que converte a energia solar (proveniente da radiação solar) em energia térmica e gera eletricidade através do processo de conversão de energia (Alam *et al.*, 2023).

2.1 Princípio de operação e tipos de usinas CSP

As plantas de energia solar térmica, representadas esquematicamente na Fig. 2, normalmente utilizam dois circuitos interconectados para conseguir converter a energia solar em eletricidade. O primeiro circuito é denominado campo solar enquanto o segundo circuito é denominado de ciclo de geração de vapor ou ciclo de potência.

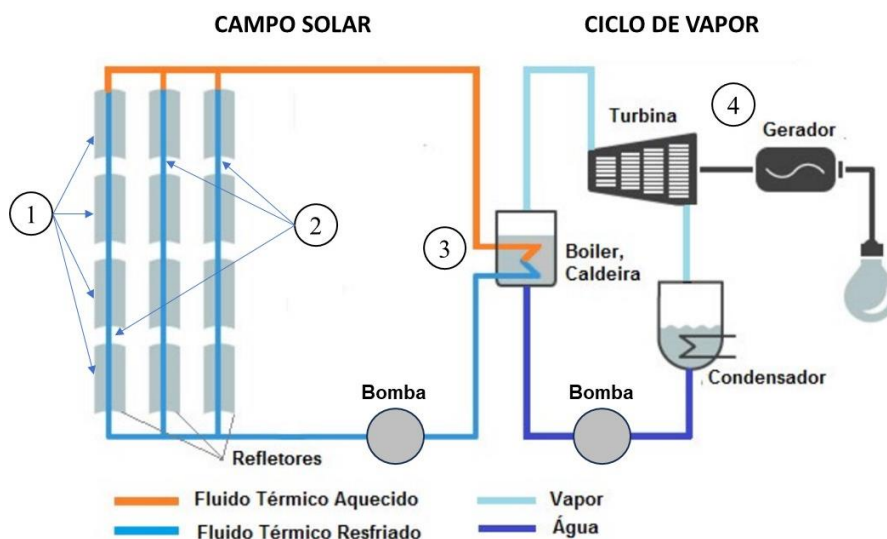


Figura 2 – Representação esquemática de uma usina CSP (Adaptado de: Garcia *et al.*, 2017).

Analisando a Fig. 2 tem-se que o princípio de conversão de energia de uma usina CSP inicia-se no concentrador solar (ponto 1), onde é captada a radiação solar e concentrada sobre os tubos absorvedores ou receptores (ponto 2). Pelo interior destes tubos é bombeado um fluido térmico de modo a converter a energia radiante em térmica. Este fluido é transportado até um permutador de calor (ponto 3) onde cederá sua energia para o circuito de vapor. O circuito de vapor opera como um ciclo Rankine, em que um fluido (como a água, por exemplo), é evaporado na Caldeira (ponto 3). O vapor, a elevada pressão e temperatura, é transportado para a turbina sofrendo uma expansão, convertendo a energia térmica em energia cinética. Como a turbina está acoplada ao eixo do gerador, o movimento rotacional induz à geração de eletricidade (Du; Zhifeng, 2023).

Dependendo da aplicação, a energia térmica proveniente do campo solar pode ser armazenada termicamente (em tanques ou reservatórios) e ser utilizada para gerar eletricidade após o anoitecer ou durante períodos de condições climáticas adversas (Lilliestam *et al.*, 2020), como demonstrado na Fig. 3.

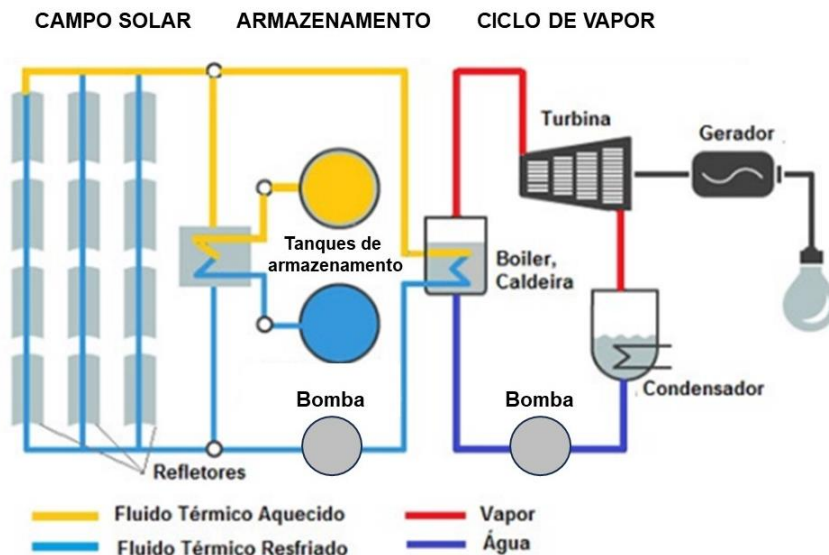


Figura 3 – Representação de uma usina CSP com armazenamento (Adaptado de: Garcia *et al.*, 2017).

Dado que a energia primária de uma planta CSP provém do sol, sua produção está condicionada a quantidade de irradiação diária recebida no local da usina. Como a irradiação varia ao longo do dia, plantas com armazenamento térmico foram idealizadas para estocar energia quando a quantidade de energia solar for superior à demandada pelo sistema. O uso de tanques de armazenamento permite alcançar essa despachabilidade, ou seja, a capacidade de armazenar, controlar e disponibilizar de forma confiável a energia de acordo com a demanda. Deste modo, esse sistema de armazenamento pode ser utilizado para evitar oscilações da geração por fonte solar provocadas por nuvens ou sombreamento, ou até mesmo para gerar eletricidade por horas após o pôr do sol, dependendo do tamanho do sistema (De Sá, 2018). A Fig. 4 esquematiza esta ideia.

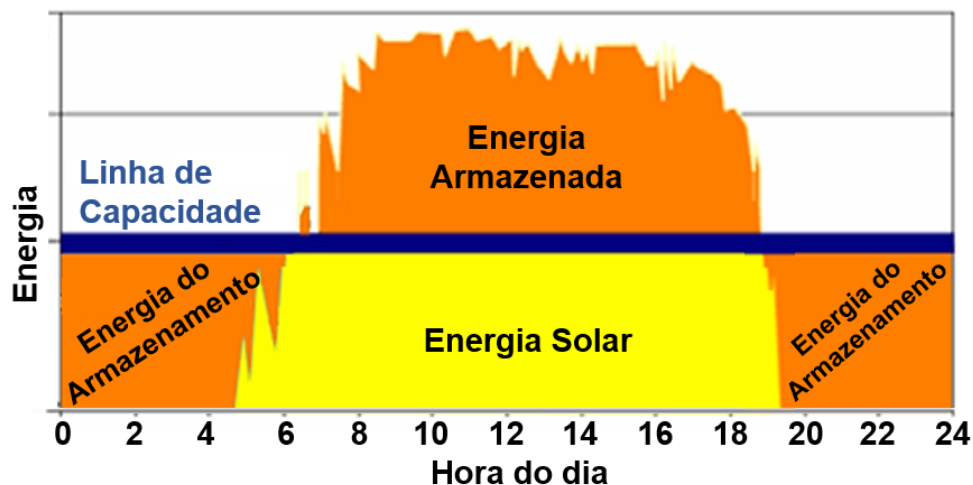


Figura 4 – Conceito de armazenamento de energia em CSP (Adaptado de: Geyer *et al.*, 2007).

Vale destacar que através da instalação de um queimador no circuito do campo solar, combustíveis fósseis podem ser integrados ao sistema, atuando como um “*backup*” em momentos de baixa disponibilidade da energia solar. Estas plantas são conhecidas como usinas CSP hibridizadas (Soria *et al.*, 2015) (Milani *et al.*, 2017).

2.2 Tecnologia de concentradores solares

Como já foi descrito, toda a conversão energética se inicia nos concentradores solares, responsáveis pela captação da irradiação solar e sua concentração em um receptor (ou absorvedor). Atualmente são utilizadas quatro tecnologias principais de concentradores em plantas CSP, sendo estas: (1) Coletor de Calha Parabólico - PTC (*Parabolic Trough Collector*), (2) Refletor Linear Fresnel - LFR (*Linear Fresnel Reflector*), (3) Pratos Parabólicos Solar - SPD (*Solar Parabolic Dishes*) e (4) Torre de Energia Solar - SPT (*Solar Power Tower*), como apresentados na Fig. 5.

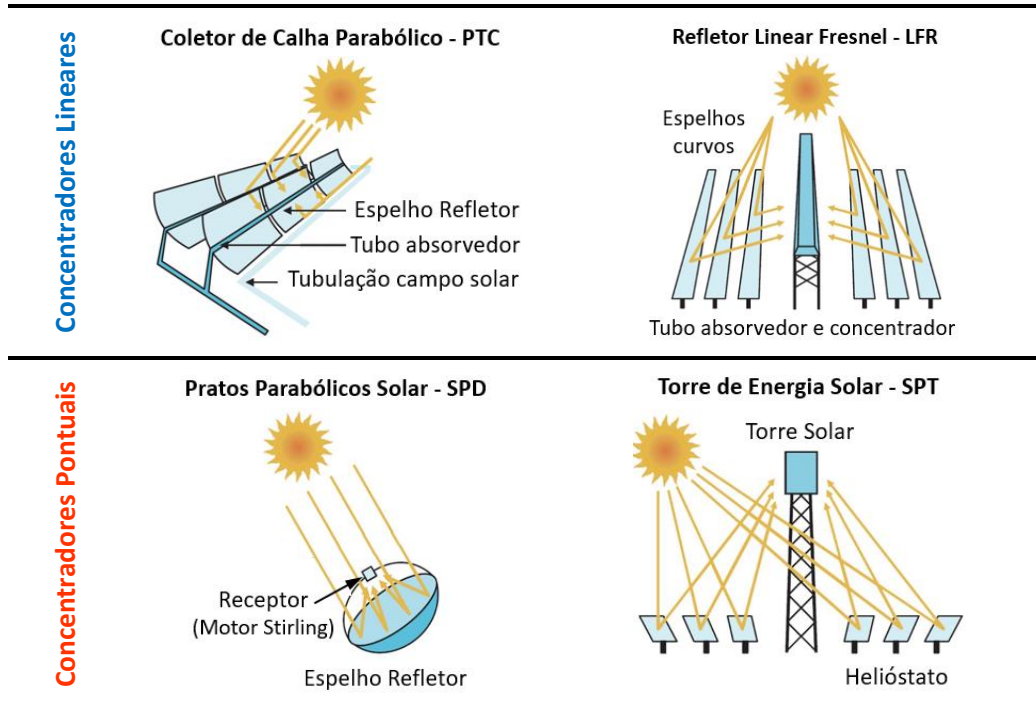


Figura 5 – Tipo de Concentradores solares para usinas CSP (Adaptado de IEA, 2014).

Como destacado na Fig. 5, essas tecnologias também podem ser classificadas pelo tipo de concentração solar obtido nos receptores, sendo eles: linear ou pontual. O primeiro formato de concentração ocorre quando a radiação é concentrada linearmente sobre o absorvedor, geralmente um tubo onde escoia o fluido térmico. Já no segundo formato, a concentração solar é pontual, aumentando a intensidade da radiação solar e, por consequência, alcançando maiores fatores de concentração e de temperatura no absorvedor (Pigozzo Filho, 2013). A Tab. 1 apresenta uma classificação das quatro tecnologias CSP, apresentando a capacidade típica para cada uma delas, assim como a faixa de temperatura operacional e de eficiência anual.

Tabela 1 – Funcionalidades gerais das principais CSP (Alam *et al.*, 2023).

Tecnologia CSP	Capacidade Típica [MW]	Temperatura operacional [°C]	Eficiência anual [%]
PTC	100-300	250-550	14-22
LFR	10-200	150-550	13-18
SPD	0,01-0,025	600-1500	18-25
SPT	10-200	500-1200	15-23

O emprego de cada uma dessas tecnologias está condicionado ao seu uso, ou seja, à área disponível do campo solar, aos valores de irradiação da região onde a usina está instalada e à energia elétrica que se deseja gerar.

De acordo com a Tab. 1, a tecnologia de calha parabólica - PTC e Fresnel – LFR, apresentam temperaturas operacionais médias, pois em ambas as tecnologias a concentração se dá de forma linear. Já a tecnologia de prato parabólico – SPD e torre solar – SPT, operam a temperaturas elevadas, dada a concentração pontual da irradiação (Alam *et al.*, 2023). Não obstante, apesar da tecnologia SPD apresentar uma maior eficiência, também exibe os menores valores de geração elétrica, isto é, dado que os pratos parabólicos possuem um receptor de pequena área em que se localiza o conjunto motor Stirling-gerador, e, portanto, diferentemente de seus concorrentes, este tipo de CSP não emprega o ciclo Rankine.

A capacidade e a eficiência anual de qualquer usina CSP é influenciada por diversos fatores, incluindo a disponibilidade de energia solar, eficiência do receptor, qualidade do fluido térmico, precisão de rastreamento, medidas para minimizar perdas do sistema e eficiência do fluido no circuito de potência (água para o ciclo Rankine convencional e fluidos orgânicos para o ciclo Rankine orgânico).

3. MATRIZ DE GERAÇÃO ELÉTRICA POR CSPs

3.1 Tecnologia CSP no mundo

De acordo com a empresa de pesquisa energética brasileira (EPE), no ano de 2020 o mundo produziu um total de 27 milhões de GWh de energia elétrica, sendo que, 0,1% desta energia foi produzida pela fonte termossolar (EPE, 2023b). Isto evidencia que o número de usinas heliotérmicas em operação, e seu potencial de geração, é bastante reduzido quando comparado com outras fontes de energia. Segundo Khan *et al.* (2023), em 2022 a produção de energia solar estimada em plantas heliotérmicas no mundo, considerando a capacidade de projetos em construção, assim como projetos de pesquisa e desenvolvimento - P&D, foi cerca de 10 GW de energia, apresentando um crescimento cinco vezes maior ao registrado na última década.

A Fig. 6 apresenta os projetos heliotérmicos no mundo, tanto em operação como em construção até o ano de 2022. A maioria destas usinas heliotérmicas operam na Espanha e nos Estados Unidos, sendo que estas duas nações detêm mais do 80% da capacidade global instalada em usinas CSP.

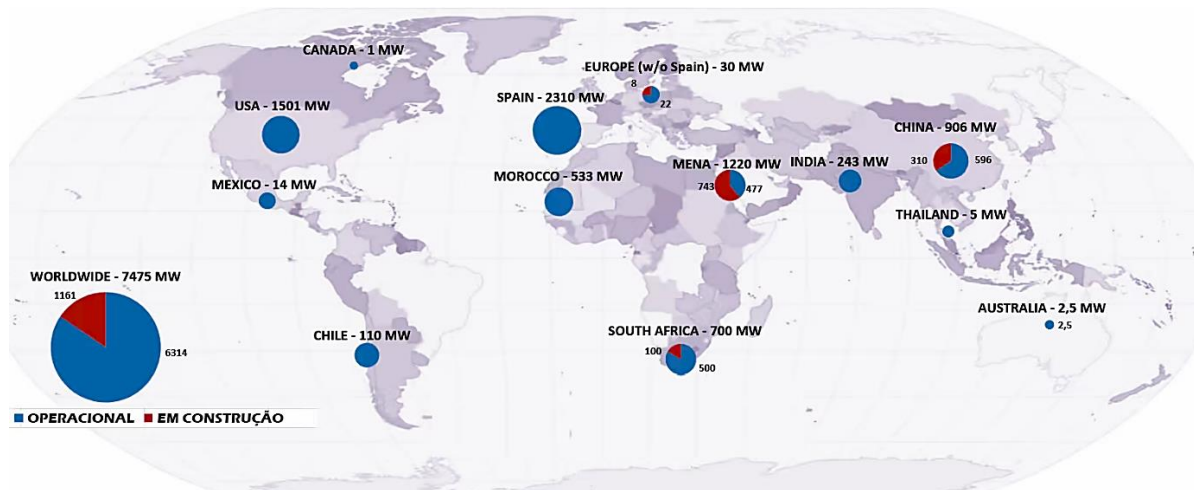


Figura 6 – Projetos Heliotérmicos no Mundo até 2022 (Adaptado de SOLARPACES, 2022).

Segundo os dados do relatório mais recente do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), a análise global das plantas heliotérmicas revelam a existência de aproximadamente 116 instalações operacionais, 10 em fase de construção, 10 inativas e 10 descontinuadas, os valores da geração para cada grupo são exibidos na Fig. 7 (NREL, 2022).

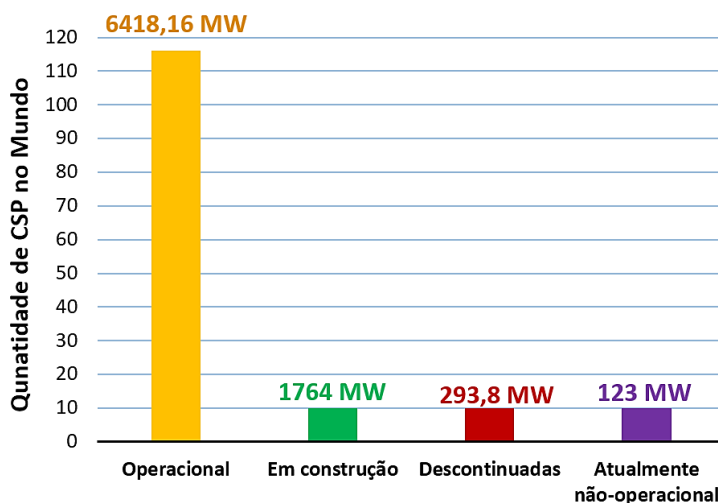


Figura 7 – Produção de Energia Solar em 2022 (NREL, 2022).

O valor de 6418,16 MW da potência elétrica gerada pelas usinas operacionais surge da combinação de plantas heliotérmicas, com e sem armazenamento térmico de energia, assim como de plantas hibridizadas, contendo todas as tecnologias de concentradores solares anteriormente descritas. Em média, as 10 instalações em construção terão uma capacidade de geração de 176,4 MW cada. Note-se que as plantas não operacionais e descontinuadas correspondem a usinas de baixa capacidade de geração, quando comparadas as que estão em fase de construção.

Khan *et al.* (2023) destacam que embora tenha ocorrido um crescimento da capacidade instalada de usinas CSP, ainda é uma tecnologia relativamente imatura. Nesse sentido, dependem de estímulos para reduzir o risco do setor privado e incentivar os desenvolvedores a implementar a nova tecnologia.

3.2 Tecnologia CSP: hispano América e Brasil

Na região da Hispano América, a tecnologia CSP se destaca em poucos países, México e Chile principalmente. O México apresenta uma das regiões com melhores irradiação solares, com uma média maior do que $2000 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$ (Bernardelli, 2011). Atualmente, o país tem em operação apenas uma CSP funcionando no modo híbrido, isto é, a planta que utiliza gás natural para produzir eletricidade em momentos de baixa demanda solar. Essa usina possui uma capacidade nominal de 14 MW e usa um coletor parabólico (NREL, 2022).

O Chile conta com uma irradiação solar média maior do que $2700 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$ (Bernardelli, 2011). Neste momento, o país possui uma usina com capacidade nominal de 110 MW, com 17,5 h de autonomia de armazenamento térmico, apresentando destaque entre os demais países da América do Sul. Além disso, esse sistema está integrado a um sistema fotovoltaico com 100 MW de capacidade (NREL, 2022).

A Argentina apresenta uma grande potencial para aproveitar a energia solar devido às suas condições geográficas favoráveis. Nas regiões andinas e sub-andinas, o nível médio de irradiação solar pode chegar a $2182 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$. Apesar disso, a produção elétrica por CSP se encontra em fase de desenvolvimento. Atualmente o país conta com um projeto de uma usina-piloto de 30 kW utilizando a tecnologia Fresnel linear (Garcia *et al.*, 2017).

No Brasil, apesar de incipiente, as aplicações de CSP estão relacionadas a produções locais ou em projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D), embora a tecnologia apresente um alto potencial. Na UHE Porto Primavera, a CESP opera uma usina termossolar por PTC com potência de 0,5MW viabilizada através de uma chamada estratégica para projetos de P&D da ANEEL. No país, existem aplicações, que usam helióstatos para iniciativas voltadas para a geração de calor de processo para a indústria de alimentos, como exemplo a empresa multinacional Kraft Foods, que está localizada no município de Vitória de Santo Antão, Pernambuco, que possui um campo solar com calhas parabólicas para fornecer água pressurizada a temperaturas de $110 \text{ }^\circ\text{C}$ (Silva, 2020).

Algumas iniciativas se destacam como o projeto SMILE (Sistema Solar Híbrido com Microturbina para Geração de Eletricidade e Cogeração de Calor na AgroIndústria) que prevê a construção de duas usinas solares com torre central para geração de eletricidade e cogeração de calor integrado a duas atividades agroindustriais (Laticínio e Matadouro) (SMILE, 2023). As usinas heliotérmicas serão construídas em Pirassununga/ São Paulo, cuja região apresenta níveis de irradiações normal direta (*Direct Normal Irradiance* - DNI) médio de $2.065 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{ano}$, e em Caiçara do Rio do Vento (que apresenta níveis de DNI médio de $1999 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{ano}$), no Rio Grande do Norte. Em Pirassununga, a planta ocupará uma área de 0,7 hectares com uma capacidade nominal de 100 kW e será utilizada para atividades de pesquisa e desenvolvimento por parte da Universidade de São Paulo (USP). Em Caiçara do Rio dos Ventos, esse sistema terá uma capacidade nominal de 100 kW ocupando 1 hectare (Amaral, 2022).

Na cidade de Petrolina, Pernambuco, existe um projeto (denominado por P&D+I Chesf - CSP Helioterm) que prevê uma planta de calhas parabólicas e capacidade instalada de 1 MW, coordenado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) e pela Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF). Outro projeto liderado pela CHESF (denominado por P&D+I Chesf - Aneel da Chamada 19/2015 Chesf Torre Solar 1), visa o desenvolvimento e a implantação de uma planta heliotérmica de torre solar, de 1 MWth (250 kWe), com armazenamento térmico de 7 horas a plena carga (CHESF, 2020).

Vale ressaltar que o Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 brasileiro não contempla a inserção da fonte solar como possibilidade complementar às demandas projetadas para o decênio, dada a sua atual produção (Garcia *et al.*, 2017).

Assim, as centrais geradoras heliotérmicas ainda não fazem parte dos planos de expansão a curto prazo, mas é relevante destacar as vantagens dessa tecnologia quando combinada com armazenadores térmicos. Essas centrais podem desempenhar um papel complementar às fontes renováveis intermitentes, como eólica e fotovoltaica, além de atender à capacidade exigida durante picos de demanda do Sistema Interligado Nacional, SIN (MME, 2015).

4. MATRIZ DE DISTRIBUIÇÃO ELÉTRICA E POTENCIAL SOLAR BRASILEIRO

No Brasil, a eletricidade é fornecida por dois sistemas principais: o Sistema Interligado Nacional (SIN) e os Sistemas Isolados (SISOL).

O SIN é um sistema integrado que conecta fontes de geração a centros consumidores em todo o país. O SIN abrange todos os estados, exceto Roraima. Na região Norte, o atendimento pelo SIN se limita principalmente às capitais e regiões metropolitanas. Em outros municípios, a energia elétrica é fornecida por meio de SISOL (Leite; Sousa, 2020).

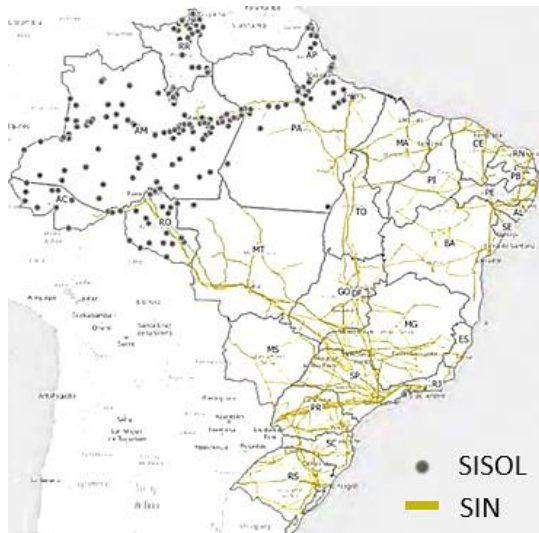
Os SISOL são definidos como sistemas de serviço público de distribuição de energia elétrica desconectados do SIN (Decreto nº 7.246/2010), que atendem principalmente áreas urbanas da região amazônica, com a exceção de Fernando de Noronha (Leite; Sousa, 2020). Atualmente, os SISOL totalizam 1.160 MW e atendem 3,3 milhões de pessoas. Além disso, 97% da capacidade de geração dos SISOL utiliza óleo diesel como combustível (EPE, 2019).

A Fig. 8a mostra a localização dos SISOL e as linhas de transmissão do SIN no território brasileiro, em que é possível notar que existem comunidades em regiões remotas que não são atendidas pelo SIN. Nessas áreas, o acesso à eletricidade é feito por sistemas isolados (SISOL), muitos baseados em geradores a diesel e alguns em sistemas fotovoltaicos de pequena escala (Leite; Sousa, 2020).

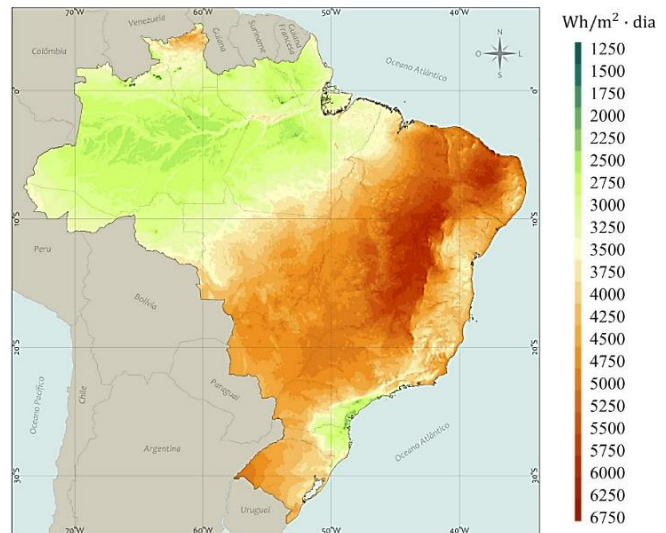
Apesar de abranger a maioria da população brasileira, os dois sistemas principais de fornecimento de eletricidade ainda não atendem a todos os brasileiros. Estima-se que 0,2% da população brasileira não tenha acesso à eletricidade (IBGE, 2022).

Contrastando a matriz de distribuição elétrica brasileira, Fig. 8a, com o mapa de irradiação solar média anual do Brasil, Fig. 8b, observa-se que a maior parte do território nacional possui valores de DNI superiores a $4000 \text{Wh/m}^2 \cdot \text{dia}$. Porém, grandes regiões do Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, apresentam cenários ainda mais favoráveis, com valores de DNI superiores a $2000 \text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$.

Alguns autores como Malagueta *et al.*, (2013), Heller (2017) e Ferreira (2018), apontam que as tecnologias CSP se mostram mais adequadas ou apresentam uma viabilidade técnico-econômica favorável em áreas com níveis de DNI superiores a $2000 \text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$ ou $5500 \text{Wh/m}^2 \cdot \text{dia}$. Portanto, o DNI é um parâmetro que representa o fluxo de energia solar incidente por unidade de área (W/m^2), que possibilita estimar a eficiência, prever as condições e viabilidade comercial do projeto (Heller, 2017).



(a) SIN e SISOL (Leite; Sousa, 2020)



(b) DNI do Brasil (Pereira *et al.*, 2017).

Figura 8 – Comparação entre Irradiação, Sistema Interligado Nacional (SIN) e Sistemas Isolados (SISOL).

Embora este valor de DNI seja recomendado por alguns autores, a tecnologia de usinas CSP já tem sido empregada com sucesso em locais com valores de DNI inferior ao indicado. A Tab. 2 apresenta algumas CSP em operação que possuem níveis de DNI inferiores a $2000 \text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$.

Tabela 2 – Usinas CSP em operação com níveis de DNI inferior a $2000 \text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$ (NREL, 2022).

Estação Solar	País	Tecnologia CSP	Área campo solar (m^2)	Capacidade [MW]	Nível de DNI [$\text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$]
Jülich Solar Tower	Alemanha	SPT	17.650	1,5	902
Badaling Dahan 1 MW Tower	China	SPT	10.000	1,0	1290
Megha Solar Plant	Índia	PTC	366.240	50	1476
ASE Demo Plant CSP Project	Itália	SPT	3.398	0,4	1527
Huaqiang TeraSolar 15MW Fresnel	China	LFR	170.000	15	1767
Shouhang Dunhuang Phase I - 10 MW	China	SPT	175.375	10	1777
Lanzhou Dacheng Dunhuang (DCTC Dunhuang) - 10MW Fresnel	China	LFR	Indisponível	10	1786

Os valores apresentados na Tab. 2 foram ordenados de forma crescente de acordo ao nível de DNI de cada planta. Observa-se que não existe uma relação direta entre DNI, capacidade de produção, tecnologia CSP empregada e área do campo solar. A maior usina é capaz de gerar 50 MW de energia elétrica, com um valor de DNI de $1476 \text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$, para 366.240m^2 de campo solar, empregando-se concentradores do tipo Coletores de Calha Parabólica – PTC. Ao comparar as duas primeiras plantas CSPs da Tab. 2, pode-se observar que ambas empregam a tecnologia de Torre Solar: a usina da Alemanha, apesar de apresentar 70% do DNI da usina Chinesa, produz 50% mais energia, porque a área do campo solar é 76,5% maior. Portanto, fica demonstrado que cada projeto de CSP é único e muitas variáveis influenciam na sua capacidade de geração e eficiência. Os casos apresentados evidenciam que não existe um consenso na literatura sobre o valor de DNI mínimo recomendado para projetos termossolares.

Extrapolando essa lógica, configura-se a possibilidade de implementar esta tecnologia em quase todo o território nacional, até nas regiões com Sistemas Isolados (SISOL), dado que o Brasil possui uma DNI média superior a $1460 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$ na maior parte do território (ver Fig. 8b). A versatilidade de se construir usinas com armazenamento térmico e/ou hibridizadas, reforça ainda mais esta hipótese.

Um outro ponto a ser considerado é a carência que existe de um licenciamento ambiental claro sobre a implementação da energia solar no país, trazendo uma insegurança jurídica e ao mesmo tempo afastando investimentos locais. No Brasil, 66,7% dos estados possuem algum tipo de regulamentação estadual sobre energia heliotérmicas. Dos estados restantes, 11,1% possuem normas em que alguns municípios legislaram sobre o assunto devido a interesses econômicos. Porém, 22,2% dos estados brasileiros não possuem nenhuma norma sobre o assunto. A Fig. 9 lista os estados de acordo com estas três categorias.

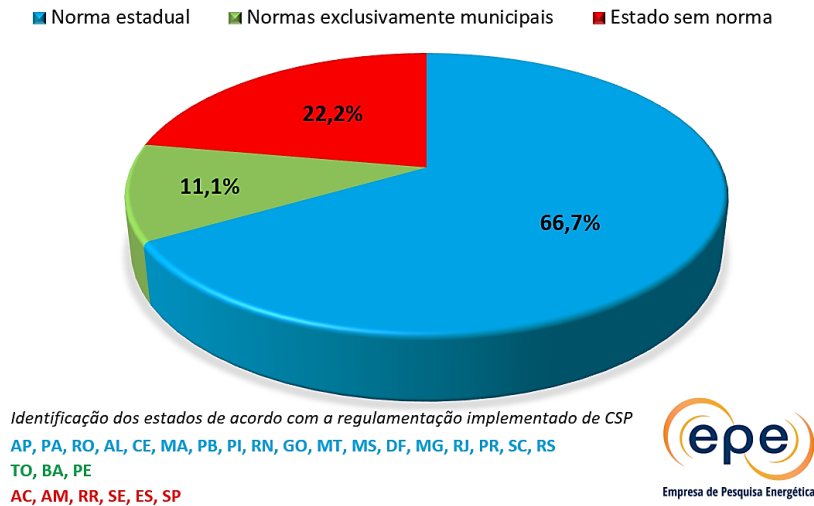


Figura 9 – Panorama da legislação heliotérmica existente no Brasil (EPE, 2022)

Além disso, segundo EPE (2022), as próprias regulamentações existentes apresentam uma ausência de padronização dos procedimentos para licenciamento ambiental dos empreendimentos solares, demonstrada pela diversidade dos critérios de enquadramento por área ou por potência, da definição do potencial poluidor/degradador/impacto ambiental, das condições para dispensa de licenciamento ambiental e dos estudos ambientais requeridos. Todos estes fatos dificultam o investimento da tecnologia para essas regiões.

Nesse sentido, nota-se uma falta de padronização da terminologia e dos critérios de licenciamento ambiental. A EPE (2022), destaca a importância de se ter uma normativa nacional para a fonte solar, pois poderia agregar mais eficiência aos procedimentos realizados pelos órgãos licenciadores, além de possibilitar mais segurança jurídica aos empreendedores responsáveis pela implantação dos empreendimentos, beneficiando o ambiente de negócios da fonte solar no país

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho além de descrever a tecnologia empregada nas plantas CSPs, apresentou uma visão da sua exploração no mundo e avaliou o potencial brasileiro frente ao uso desta tecnologia. Essa análise foi realizada por meio de uma pesquisa bibliográfica em que foram explorados o cenário de produção atual, bem como o Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 e o capital da irradiação solar de todo o território nacional.

Nessa perspectiva, nota-se que a produção de energia solar no Brasil é ainda incipiente ao levar em conta o seu potencial. No mapa de irradiação solar anual do Brasil foi evidenciado que a maior parte do território nacional apresenta valores médios de DNI superiores a $1460 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$, existindo grandes regiões no Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, com valores superiores a $2000 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$. Mesmo as regiões com menor irradiação normal direta se apresentam com potencial para a exploração deste tipo de tecnologia. Existem no mundo usinas CSPs completamente funcionais que operam com valores de irradiação próximos ao mínimo valor da média brasileira.

Dado que usinas CSPs podem ser projetadas para serem hibridizadas com outros combustíveis e contar com armazenamento térmico de energia, estas poderiam ser implementadas nas regiões brasileiras que ainda hoje se encontram distante do Sistema Interligado Nacional (SIN) e que setorialmente contam com Sistemas Isolados (SISOL), muitas vezes não conseguindo cobrir a totalidade da população.

Foi evidenciado que atualmente não existe uma regulamentação clara sobre o licenciamento de plantas termosolares no país, as regulamentações existentes apresentam ausência de padronização dos procedimentos para o licenciamento ambiental dos empreendimentos solares, trazendo insegurança jurídica e ao mesmo tempo afastando investidores.

Diversos projetos de pesquisa e desenvolvimento, como o projeto SMILE com duas CSPs de 100 kW cada uma, localizadas em Pirassununga/ SP e Caiçara do Rio do Vento/RN, e os projetos da CHESF para construir uma CSP de

1MW e outra de 250 kW em Petrolina/PE, além da usina termossolar de 0,5 MW junto a UHE Porto Primavera, se apresentam como os primeiros projetos em operação e/ou construção com escala consideravelmente importante. Espera-se que estes projetos forneçam maior conhecimento da tecnologia e impulsionem sua maturidade fomentando o desenvolvimento de novas soluções de engenharia que permitam superar as barreiras econômicas e tecnológicas que ainda limitam seu crescimento.

Portanto, a tecnologia CSP no Brasil apresenta-se como uma estratégia promissora para o panorama energético do país, apesar de ainda não representar uma parcela significativa da capacidade instalada.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Fundo de Financiamento de Estudos de Projetos e Programas (FINEP), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Sistema de Informações de Geração da ANEEL SIGA. 2023. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiJ9>>. Acesso em: 27 out. 2023.
- Alam, M. I.; Nuhash, M. M.; Zihad, A.; Nakib, T. H.; Ehsan, M. M. Conventional and Emerging CSP Technologies and Design Modifications: Research Status and Recent Advancements. *International Journal of Thermofluids*, v. 20, p. 100406, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100406>>. Acesso em: 03 ago. 2023.
- Amaral, G. S. Análise de viabilidade técnico-econômica da operação de uma planta Heliotérmica de tecnologia de Calha Cilindro-Parabólica em Rosana-SP. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energia), Universidade Estadual Paulista, Rosana.
- Bernardelli, F. Energía solar termodinámica en América Latina: los casos del Brasil, Chile y México. 2011. Disponível em: <<https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/ff75ef08-7516-40cf-9647-e780ee957dcf/content>>. Acesso em: 24 out. 2023.
- Companhia Hidrelétrica do São Francisco - CHESF. Centro de Referência em Energia Solar de Petrolina. 2020. Disponível em: <<https://www.chesf.com.br/pdi/Documents/Centro%20de%20Refer%20C3%Aancia%20em%20Energia%20Solar%20de%20Petrolina.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2023.
- De Sá, A. B. Optical and thermo-hydraulic characterization of linear Fresnel solar concentrators operating with direct steam generation. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Du, F.; Zhifeng, W. Blue Book of China's Concentrating Solar Power Industry 2022. China Solar Thermal Alliance (CSTA), 2023. Disponível em: <<https://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/Blue-Book-on-Chinas-CSP-Industry-2022.pdf>>. Acesso em: 21 ago. 2023.
- Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados. Horizonte 2024 – Ciclo 2019. Rio de Janeiro, 2019.
- Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Levantamento da legislação para licenciamento ambiental de empreendimentos de geração de energia elétrica por fonte solar: situação em 2022. Rio de Janeiro, 2022. 106 p. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-598/NT%20Conjunta%20Eletrobras%20EPE%20Licenciamento%20UFV%20ver2022.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2023.
- Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Painel de Dados de Micro e Minigeração Distribuída. 2023a. Disponível em: <<https://dashboard.epe.gov.br/apps/pdgd/>>. Acesso em: 30 nov. 2023.
- Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Matriz Energética e Elétrica. 2023b. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 30 out. 2023.
- Ferreira, W. M. Modelagem termodinâmica de uma planta Fresnel com geração direta de vapor e armazenamento de energia térmica. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Garcia, M. A.; Ramos, F. A.; Castro, T. L. C.; Garcia, M. A. Guia de Licenciamento Ambiental de Heliotérmicas: Subsídios para Avaliação de Impacto Ambiental. 2017. Disponível em: <<https://pnla.mma.gov.br/publicacoes-diversas?download=28:guia-de-licenciamento-ambiental-de-heliotermicas&start=20>>. Acesso em: 22 ago. 2023.
- Geyer, M.; Blanco, J.; Mehos, M.; Meier, A.; Meyer, R.; Richter, C.; Weiss, W. International Energy Agency (IEA) Solar Power and Chemical Energy Systems. Solar Paces Annual Report 2007. 2007. Disponível em: <http://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/SolarPACES-Annual-Report-2007_final.pdf>. Acesso em: 22 set. 2023.

- Heller, P. The performance of concentrated solar power (CSP) systems: analysis, easurement and assessment. Woodhead publishing, 2017.
- International Energy Agency - IEA. Technology Roadmap Solar Thermal Electricity. 2014. Disponível em: <<https://www.oecd.org/publications/technology-roadmap-solar-thermal-electricity-9789264238824-en.htm>> Acesso em: 15 set. 2023.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE. PNAD Contínua - Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios. 2022. Disponível em:<<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/9171-pesquisa-nacional-por-amostra-de-domicilios-continua-mensal.html>>. Acesso em: 30 nov. 2023.
- Khan, M. I.; Asfand, F.; Al-Ghamdi, S. G. Progress in research and technological advancements of commercial concentrated solar thermal power plants. Solar Energy, v. 249, p. 183-226, 2023.
- Leite, C. C.; Sousa, V. Exclusão Elétrica na Amazônia Legal: quem ainda está sem Acesso à Energia Elétrica?. São Paulo (SP), 2020.
- Lilliestam, J.; Ollier, L.; Labordena, M.; Pfenninger, S.; Thonig, R. The near-to mid-term outlook for concentrating solar power: mostly cloudy, chance of sun. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, v. 16, n. 1, p. 23-41, 2020. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15567249.2020.1773580?scroll=top&needAccess=true&role=tab>>. Acesso em: 18 ago. 2023.
- Luiz, E. W.; Martins, F. R.; Gonçalves, A. R.; Pereira, E. B. Analysis of intra-day solar irradiance variability in different Brazilian climate zones. Solar Energy, v. 167, p. 210-219, 2018.
- Malagueta, D., Szklo, A., Borba, B. S. M. C., Soria, R., Aragão, R., Schaeffer, R., Dutra, R. Assessing incentive policies for integrating centralized solar power generation in the Brazilian electric power system. Energy Policy, 59, 2013.
- Milani, R.; Szklo, A.; Hoffmann, B. S. Hybridization of concentrated solar power with biomass gasification in Brazil's semiarid region. Energy Conversion and Management, v. 143, p. 522-537, 2017.
- Ministério de Minas e Energia - MME. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2015. Disponível em:<<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2024>>. Acesso em: 23 out. 2023.
- Moreira Jr, O.; Souza, C. C. Aproveitamento fotovoltaico, análise comparativa entre Brasil e Alemanha. Interações (Campo Grande), v. 21, p. 379-387, 2020.
- National Renewable Energy Laboratory - NREL. Concentrating Solar Power Projects. 2022. Disponível em:<<https://solarpaces.nrel.gov/>>. Acesso em: 23 out. 2023.
- Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Gonçalves, A. R.; Costa, R. S.; Lima, F. L.; Rüther, R.; Abreu, S. L.; Tiepolo, G. M.; Pereira, S. V.; Souza, J. G. Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em:<<http://doi.org/10.34024/978851700089>>. Acesso em: 30 nov. 2023.
- Pigozzo Filho, V. C. Análise experimental de um sistema solar com concentrador cilindro parabólico. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Silva, R. D. S. Usinas heliotérmicas híbridas: integração de CSP com outros recursos energéticos. 2020. Disponível em:<https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/10325/1/NT_77_Diset_UsinasHeliot%C3%A9rmicasH%C3%ADbridas.pdf>. Acesso em: 24 out. 2023.
- SMILE. Projeto SMILE. 2023. Empresa Solinova - Energias Renováveis. Disponível em: <<https://www.solinova.com.br/projeto-smile>>. Acesso em: 24 out. 2023.
- SOLARPACES.CSP Projects Around the World. 2022. Disponível em:<<https://www.solarpaces.org/worldwide-csp/csp-projects-around-the-world/>>. Acesso em 23 out. 2023.
- Soria, R.; Portugal-Pereira, J.; Szklo, A.; Milani, R.; Schaeffer, R. Hybrid concentrated solar power (CSP)–biomass plants in a semiarid region: A strategy for CSP deployment in Brazil. Energy Policy, v. 86, p. 57-72, 2015.

USING THERMOSOLAR ENERGY IN BRAZIL: CURRENT SCENARIO AND DEVELOPMENT POTENTIAL

Abstract. *This work addresses the Brazilian potential to generate electric power through heliothermal energy. In heliothermal technology, also known as concentrated solar power (CSP), solar irradiation heats a working fluid, which in turn drives a turbine for electricity generation. The text describes the technology employed by CSP solar plants and analyzes the matrices of electricity generation by CSP worldwide, in Latin America, and in Brazil. Globally, only 0.1% of the electricity generated in 2020 was produced using heliothermal technology. In Latin America, Chile and Mexico are the main countries employing CSP plants on an industrial scale. Brazil, on the other hand, demonstrates significant potential for exploring this energy source, considering the levels of incident solar irradiation compared to other countries where CSP technology has been implemented. The majority of the Brazilian territory has direct normal irradiance values exceeding 1460 kWh/m²-year, which is similar to or higher than the irradiance values found in several operational plants worldwide. Therefore, it is feasible to theorize that the entire national territory has the potential to benefit from this application, especially in regions not connected to the national interconnected system (SIN).*

Keywords: Solar energy, Thermosolar energy, Heliothermal energy