

Nota Técnica

USINAS HELIOTÉRMICAS HÍBRIDAS: INTEGRAÇÃO DE CSP COM OUTROS RECURSOS ENERGÉTICOS

Nº 77

Diset

Diretoria de Estudos e Políticas Setoriais
de Inovação e Infraestrutura

Rogério Diogne de Souza e Silva

Novembro de 2020



Nota Técnica

Nº 77

Diset

Diretoria de Estudos e Políticas Setoriais
de Inovação e Infraestrutura

USINAS HELIOTÉRMICAS HÍBRIDAS: INTEGRAÇÃO DE CSP COM OUTROS RECURSOS ENERGÉTICOS

Rogério Diogne de Souza e Silva

ipea

Governo Federal

Ministério da Economia

Ministro Paulo Guedes

ipea Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

Fundação pública vinculada ao Ministério da Economia, o Ipea fornece suporte técnico e institucional às ações governamentais – possibilitando a formulação de inúmeras políticas públicas e programas de desenvolvimento brasileiros – e disponibiliza, para a sociedade, pesquisas e estudos realizados por seus técnicos.

Presidente

Carlos von Doellinger

Diretor de Desenvolvimento Institucional

Manoel Rodrigues Junior

Diretora de Estudos e Políticas do Estado, das Instituições e da Democracia

Flávia de Holanda Schmidt

Diretor de Estudos e Políticas

Macroeconômicas

José Ronaldo de Castro Souza Júnior

Diretor de Estudos e Políticas Regionais, Urbanas e Ambientais

Nilo Luiz Saccaro Júnior

Diretor de Estudos e Políticas Setoriais de Inovação e Infraestrutura

André Tortato Rauen

Diretora de Estudos e Políticas Sociais

Lenita Maria Turchi

Diretor de Estudos e Relações Econômicas e Políticas Internacionais

Ivan Tiago Machado Oliveira

Assessor-chefe de Imprensa e Comunicação (substituto)

João Cláudio Garcia Rodrigues Lima

Ouvidoria: <http://www.ipea.gov.br/ouvidoria>

URL: <http://www.ipea.gov.br>

Nota Técnica

Nº 77

Diset

Diretoria de Estudos e Políticas Setoriais
de Inovação e Infraestrutura

USINAS HELIOTÉRMICAS HÍBRIDAS: INTEGRAÇÃO DE CSP COM OUTROS RECURSOS ENERGÉTICOS

Rogério Diogne de Souza e Silva

ipea

EQUIPE TÉCNICA

Rogério Diogne de Souza e Silva

Pesquisador do Subprograma de Pesquisa para o Desenvolvimento Nacional (PNPD) na Diretoria de Estudos e Políticas Setoriais de Inovação e Infraestrutura (Diset) do Ipea.

DOI: <http://dx.doi.org/10.38116/ntdiset77>

As publicações do Ipea estão disponíveis para *download* gratuito nos formatos PDF (todas) e EPUB (livros e periódicos). Acesse: <<http://www.ipea.gov.br/portal/publicacoes>>.

As opiniões emitidas nesta publicação são de exclusiva e inteira responsabilidade dos autores, não exprimindo, necessariamente, o ponto de vista do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada ou do Ministério da Economia.

É permitida a reprodução deste texto e dos dados nele contidos, desde que citada a fonte.
Reproduções para fins comerciais são proibidas.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 ENERGIA HELIOTÉRMICA	7
3 USINAS DE CSP HÍBRIDAS	10
4 CENÁRIO BRASILEIRO	12
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	15
REFERÊNCIAS	15

O Brasil apresenta um diversificado potencial de recursos energéticos, renováveis ou não, cuja viabilidade é mensurada a partir de características técnicas, ambientais e econômicas. Quando especificamos o problema para o setor elétrico, incluem-se aspectos resultantes da conversão da fonte primária de energia em eletricidade, bem como características de despachabilidade e armazenamento que influenciarão na operação do sistema interligado nacional.

Nesse contexto, apresenta-se aqui um cenário de utilização da energia solar térmica, destacando-se o estado da arte tecnológico, oriundo de resultados de projetos internacionais. São abordadas desde as tecnologias de captação da luz solar até composições híbridas de geração de energia para o aumento da viabilidade de sua aplicação no setor elétrico.

A presente nota técnica baseia-se na experiência internacional para contextualizar o potencial e as dificuldades de desenvolvimento da tecnologia no Brasil, e integra o projeto Novas Tecnologias e Infraestrutura, cooperação entre o Ipea e a Secretaria de Desenvolvimento da Infraestrutura (SDI) do Ministério da Economia, que visa identificar novas tecnologias que podem alterar a oferta e a demanda por infraestrutura no Brasil.

2 ENERGIA HELIOTÉRMICA

O processo de geração de eletricidade a partir da energia heliotérmica utiliza a luz solar para aquecimento de um fluido, seguido da geração de vapor, acionamento de uma turbina e, finalmente, a geração de energia elétrica. Observe-se que a luz solar é convertida em vapor para o acionamento de uma turbina, portanto, tem-se um processo de usina termoeletrica, e, nesse sentido, destacam-se dois aspectos na busca de maior viabilidade dessa fonte: a possibilidade de armazenamento de energia e a utilização de outras fontes para produção de calor complementares à luz solar.

Atualmente, para a primeira etapa do processo, ou seja, a utilização da luz solar para aquecimento de um fluido, a tecnologia mais utilizada é a de coletores concentrados. Esse tipo de usina é identificado como CSP (do inglês *concentrated solar power*). Essa primeira etapa é denominada campo solar, e é composta por espelhos, receptores, estruturas de suporte, sistemas coletores, fluido de transferência de calor, trocador de calor, sistemas de bombeamento de fluido, sistema de rastreamento e tubulações. Para essa finalidade, existem quatro tipos de coletores, que denominam e classificam o tipo de usina CSP: calha ou cilindro parabólico, torre solar, refletor linear Fresnel e disco parabólico.

A segunda etapa do processo é denominada de bloco de potência, sendo composta por turbina, condensador, superaquecedor, sistemas de bombeamento, gerador, trocadores de calor e torre de resfriamento.

A última etapa do processo de uma usina CSP é o armazenamento de energia térmica; deve-se ressaltar que uma usina CSP pode não possuir sistema de armazenamento de energia térmica (TES, do inglês *thermal energy storage*), no entanto, armazenar energia térmica aumenta a viabilidade econômica da usina. Os sistemas dessa etapa incluem a metodologia de encapsulamento, fluido de transferência de calor, tanques de armazenamento, trocadores de calor e isolamento do tanque. No ciclo de geração de energia da usina CSP, o fluido aquecido entra em um TES, em que o calor armazenado é recuperado para acionar as turbinas das usinas de CSP continuamente, durante a noite ou em dias com o tempo nublado. As instalações de armazenamento nem sempre são incorporadas às plantas de CSP devido ao alto custo de construção. A esse respeito, podemos citar a Espanha, em que cerca de 40% das plantas de CPS possuem TES (Islam *et al.*, 2018).

Uma usina CSP pode produzir eletricidade em escala, capaz de atender aos sistemas de energia elétrica, sobretudo com a integração do armazenamento de energia térmica ou em operação híbrida com outras fontes de calor, ofertando energia confiável e despachável, ou seja, disponível sob demanda, essencial para sistemas de energia elétrica interligados. Islam *et al.* (2018) afirmam que, em função da elevada eficiência energética, as usinas CSP podem contribuir com a geração global de eletricidade de 7% até 2030 e 25% até 2050. Como se trata de uma fonte renovável, usinas CSP contribuem para a redução das emissões de CO₂ no setor elétrico globalmente. Em 2015, foram evitados 9 milhões de toneladas de CO₂ (MtCO₂), e a previsão para 2050 é que se evitem 143 MtCO₂ no ano, e 2.197 MtCO₂ acumulados em um cenário de referência (SolarPaces, 2016; Islam *et al.*, 2018).

Em função das diversas tecnologias disponíveis atualmente, o escopo e a viabilidade técnica e econômica para a implantação de usinas CSP aumentaram. No quadro 1, apresentam-se algumas características técnicas de usinas CSP.

QUADRO 1

Comparação entre as tecnologias de usinas CSP

Características	Calha ou cilindro parabólico (PTC)	Torre solar (SPT)	Refletor linear de Fresnel (LFR)	Disco parabólico (SPD)
Definição	Refletores curvados em forma de parábola, semelhante a uma calha, até um tubo receptor disposto ao longo do interior da superfície curva.	Série de superfícies refletoras planas, os helióstatos, rastreiam o sol e focam a luz direta em um receptor fixo, localizado em uma torre.	São constituídos por um conjunto de espelhos planos dispostos em filas, direcionando a radiação solar para um tubo receptor que fica acima dos espelhos.	Um concentrador parabólico de foco na forma de um disco, ou semelhante a uma placa ou prato, com sistema de rastreamento do sol, é usado em um sistema que reflete a radiação solar em um receptor no ponto focal.
Foco	Linear	Pontual	Linear	Pontual
Capacidade (MW)	10-200	10-150	10-200	0,01-0,4
Condições de operação do vapor (°C/bar)	380 a 540/100	540/100 a 160	260/50	Não se aplica
Área ocupada (ha/MW)	2-4	2-7	2-4	5
Eficiência óptica	Média	Média	Baixa	Alta
Fluido de transferência de calor	Óleo sintético, água/vapor, sal fundido, ar, CO ₂ supercrítico	Água/vapor, sal fundido, ar	Água/vapor	Ar, hidrogênio, hélio
Custo de capital (US\$/kW)	3.972	4.000	-	12.578
Custo de operação e manutenção (US\$/kWh)	0,012-0,02	0,034	-	0,21
Risco de desenvolvimento tecnológico	Baixo	Médio	Médio	Médio
Fornecedores de tecnologia	Sener, Solar Millennium, Abengoa, ACS-Cobra, Acciona, Solel, Abantia, Ibercam	Abengoa, eSolar, Sener, BrightSource, Torresol	Austra, MAN Ferrostaal	Stirling Energy Systems, Rajasthan Sun Technique Energy, SUNCNIM

Fontes: Costa *et al.* (2017) e Islam *et al.* (2018).
Elaboração do autor.

Observa-se, no quadro 1, que uma característica comum a todas é a área necessária para o campo solar, que varia entre 2 e 7 ha/MW. Quanto à faixa de potência, as usinas com cilindros parabólicos, torre solar e refletor de Fresnel conseguem atender às mesmas faixas de potência. A tecnologia de calhas ou cilindros parabólicos apresenta menor risco de desenvolvimento tecnológico e menor custo operacional em relação às demais. Por sua vez, a tecnologia de disco parabólico, a mais nova de todas, apresenta maiores custos, no entanto, possui maior eficiência óptica, além de inovar quanto ao fluido de transferência de calor, utilizando hidrogênio e hélio.

Segundo Costa *et al.* (2017), para que o projeto de uma planta heliotérmica CSP seja viável, os níveis de irradiação direta normal (DNI, do inglês *direct normal irradiance*) devem estar acima dos 2.000 kWh/m²/ano. Islam *et al.* (2018), ratificam esta informação, afirmando que, para a viabilidade de uma planta CSP, o DNI deve estar na faixa de 2.000 a 2.800 kWh/m²/ano. As usinas CSP comerciais atuais estão sendo projetadas com este nível de irradiância, porém, Peterseim *et al.* (2013) inferem que usinas CSP híbridas, ou seja, aquelas que utilizam outra fonte de calor combinada com a luz solar, são viáveis para valores de DNI ≥ 1.700 kWh/m²/ano.

A tabela 1 contextualiza o cenário heliotérmico internacional. Há no mundo 6.128 MW de carga instalada em operação a partir de usinas CSP, com destaque para a Espanha, que possui 34,73% da carga instalada em operação atualmente, seguida pelos Estados Unidos com 28,40%. Os países do Oriente Médio, embora apresentem 310 MW em operação, 5% do total mundial, possuem 910 MW de capacidade instalada em usinas em construção (SolarPaces, 2020).

TABELA 1
Usinas CSP (jan. 2020)
 (Em MW)

Local	Em operação	Em construção	Projeto	Total
Mundo	6.128	1.547	1.592	9.267
Espanha	2.304	-	-	2.304
Estados Unidos	1.740	-	-	1.740
Oriente Médio	310	910	60	1.280
Chile	-	110	1.100	1.210
China	520	514	-	1.034

Fonte: SolarPaces (2020).
 Elaboração do autor.

Ainda contextualizando o cenário internacional, foram reunidas, na tabela 2, informações de algumas usinas CSP no mundo. A maior delas localiza-se nos Emirados Árabes Unidos: com DNI de 1.966 kWh/m²/ano, é uma usina híbrida com 700 MW utilizando calha parabólica e torre solar, e 250 MW de solar fotovoltaica. Parte da usina já está em operação; a potência instalada de 700 MW faz parte da quarta etapa do projeto, que inclui os 250 MW através de energia solar fotovoltaica (ACWA, 2020).

TABELA 2
Características de usinas CSP instaladas em diversos países

Potência (MW)	País	Nome	Tecnologia	Custo (US\$)	Área (ha)	Localização	DNI (kWh/m ² /ano)	Empresa
700	Emirados Árabes Unidos	Noor Energy 1 CSP ¹	Calha parabólica e torre solar	4,33 bilhões	-	24°45'25.2"N 55°22'24.9"E	1.966	ACWA Power
377	Estados Unidos	IVANPAH Solar	Torre solar	2,2 bilhões	1.400	35°33'24.7"N 115°28'13.3"W	2.757	Bright Source Energy
250	Estados Unidos	Solana Generating Station	Calha parabólica	2 bilhões	780	32°55'24.8"N 112°58'41.5"W	2.772	Abengoa Solar
135	China	Delingha	Torre solar	-	1.300	-	1.573	Bright Source Energy
125	Índia	Dhursar	Refletor linear Fresnel	-	340	26°47'8.50"N 72°0'30.00"E	1.745	Rajasthan Sun Technique Energy
100	África do Sul	Kaxu Solar One	Calha parabólica	860 milhões	-	28°54'6.00"S 19°37'15.00"E	2.986	Abengoa Solar
100	Emirados Árabes Unidos	Shams 1	Calha parabólica	600 milhões	250	23°34'13.00"N 53°42'56.00"E	2.013	Abengoa Solar
50	China	Supcon Delingha	Torre solar	154 milhões	330	37°22'13.00"N 97°16'56.00"E	1.970	Supcon Solar
50	Espanha	Ibersol Ciudad Real	Calha parabólica	225 milhões	150	38°38'36.19"N 3°58'29.60"W	2.054	Ibercam Iberdrola Renovables
20	Argélia	ISCC Hassi R'Mel	Calha parabólica	354 milhões	64	33°7'27.00"N 3°21'25.00"E	2.160	New Energy Algeria
22,5	Espanha	Borges Termosolar	Calha parabólica	173 milhões	96	41°31'44.00"N 0°47'60.00"E	1.919	Abantia
9	França	Ello Solar Thermal	Refletor linear Fresnel	-	35	42°28'9.00"N 2°3'47.00"E	1.876	SUNCNIM
2	Estados Unidos	Stillwater Geosolar Hybrid Plant	Calha parabólica	-	8,5	39°32'53.00"N 118°33'20.00"W	2.480	Enel Green Power
1,5	Estados Unidos	Tooele Army Depot	Disco parabólico	-	7	40°30'04.00"N 112°22'25.00"W	1.872	Infinia Corp

Fontes: SolarPaces (2020) e ACWA (2020).
 Elaboração do autor.

Nota: ¹ Usina em construção; previsão de início de operação em agosto de 2021.

3 USINAS DE CSP HÍBRIDAS

Segundo Peterseim *et al.* (2013), a utilização híbrida de CSP com outros combustíveis provavelmente será um nicho de mercado, comparado ao gás natural. Porém, para a implementação dessa estratégia, as plantas de CSP deverão estar localizadas mais próximas dos centros de carga e, principalmente, em regiões com acesso aos recursos do segundo combustível. Por exemplo, caso o combustível seja biomassa, o acesso a resíduos agrícolas e/ou urbanos deve ser planejado. Para utilizar os sistemas CSP como um gerador de vapor para operações em conjunto com usinas térmicas tradicionais, deve-se priorizar a identificação da tecnologia mais apropriada de CSP para hibridação com o ciclo Rankine de usinas térmicas convencionais à base de fontes de energia como o carvão mineral, gás natural, biocombustíveis, biomassa e energia geotérmica (Ghadi *et al.*, 2019).

Powell *et al.* (2017) enumeram as vantagens da utilização híbrida de usinas de CSP com outras fontes:

- custos de capital reduzidos, ao compartilhar equipamentos entre várias fontes de energia;
- aumento da disponibilidade, combinando-se energia renovável com energia disponível não renovável;
- aumento da utilização da capacidade de equipamentos de geração de energia;
- aumento da confiabilidade do sistema; e
- oportunidade para operação flexível.

Quanto à temperatura do vapor, Peterseim *et al.* (2013) inferem que as tecnologias mais adequadas para utilização híbrida, considerando-se a integração de vapor em temperaturas abaixo de 400°C, são os refletores de Fresnel e a calha parabólica com óleo sintético. Na faixa de integração de vapor com temperaturas entre 380 e 450°C, os sistemas Fresnel são mais adequados. As torres solares com geração direta de vapor são recomendadas para integração a vapor de alta temperatura, superior a 450°C da planta CSP (Peterseim *et al.*, 2013).

3.1 Usinas de CSP e biomassa

As usinas híbridas de CSP e biomassa são uma opção bem aceita para diminuir o investimento e o custo nivelado de eletricidade das usinas de CSP e, ao mesmo tempo, aumentar a disponibilidade de energia. A primeira planta de referência na Espanha comprova o conceito e provavelmente permitirá a instalação em locais de elevado DNI, onde a biomassa também está disponível, como Austrália, Índia, Grécia ou Espanha (Peterseim *et al.*, 2013).

Peterseim *et al.* (2013) asseveram que usinas CSP a espelhos de Fresnel não são indicadas para hibridização para usinas térmicas a biomassa com vapor a 480°C, citando as tecnologias CSP e fluido térmico como mais adequadas para atingir as temperaturas de vapor necessárias, além da calha parabólica com fluido de sal fundido; torre solar utilizando sal fundido, vapor d'água ou ar; disco parabólico utilizando vapor d'água.

A primeira planta híbrida de CSP e biomassa de operação comercial no mundo é o projeto de 22,5 MW denominado Borges Termosolar, em operação desde 2012 na Espanha (dados na tabela 2). A planta utiliza calhas parabólicas com óleo sintético, fornecendo vapor a 375°C para a turbina. De acordo com Peterseim *et al.* (2014), para este valor de temperatura o ideal seria a utilização de refletores Fresnel, e calha parabólica com óleo sintético, a segunda opção (Peterseim *et al.*, 2014).

Outro exemplo de usina híbrida CSP e biomassa é o projeto MINOS, na ilha de Creta, Grécia. O projeto encontra-se em desenvolvimento pela empresa NUR Energie, e consiste em um campo solar de 150 ha, utilizando torre solar e capacidade instalada de 52 MW; além da biomassa, prevê a utilização de diesel e biodiesel. Um diferencial do projeto é o desenvolvimento de uma metodologia de controle, para mitigar o efeito do sombreamento, a fim de se reduzir ao mínimo a intermitência da planta. Essa metodologia é a origem do nome da planta, Minimum Intermittency Operating System (MINOS), que se pode traduzir como Sistema Operacional de Intermitência Mínima (SolarPaces, 2020; NUR Energie, 2020).

No quadro 2, apresentam-se diferentes tipos de biomassas e suas respectivas temperaturas de vapor, correlacionando-as com as tecnologias CSP mais adequadas para a integração.

Calha parabólica		Torre solar			Refletor linear de Fresnel	Disco parabólico
Sal fundido	Vapor d'água	Sal fundido	Vapor d'água	Ar	Vapor superaquecido	Vapor d'água
<ul style="list-style-type: none"> - Biomassa limpa (480°C) - Resíduo de madeira de construção e demolição (450°C) - Combustível derivado de resíduos (430°C) - Resíduos sólidos urbanos (400°C) 	<ul style="list-style-type: none"> - Resíduos sólidos urbanos (400°C) 	<ul style="list-style-type: none"> - Biomassa limpa (480°C) - Resíduo de madeira de construção e demolição (450°C) - Combustível derivado de resíduos (430°C) - Resíduos sólidos urbanos (400°C) 			<ul style="list-style-type: none"> - Resíduo de madeira de construção e demolição (450°C) - Combustível derivado de resíduos (430°C) - Resíduos sólidos urbanos (400°C) 	<ul style="list-style-type: none"> - Biomassa limpa (480°C) - Resíduo de madeira de construção e demolição (450°C) - Combustível derivado de resíduos (430°C) - Resíduos sólidos urbanos (400°C)

Fonte: Peterseim *et al.* (2013).
Elaboração do autor.

3.2 Usinas de CSP e fotovoltaicas

Usinas híbridas que utilizam a mesma fonte primária de energia também são possíveis; a diferença estará no modo de conversão dessa energia. No caso da energia solar, a usina híbrida associa a energia solar térmica e a energia solar fotovoltaica. Em geral, essa aplicação pode ser realizada a partir de duas técnicas diferentes, a primeira semelhante às demais usinas CSP híbridas, ou seja, uma planta CSP associada a uma planta fotovoltaica; o segundo método consiste em uma planta fotovoltaica com estrutura de resfriamento dos painéis e recuperação do calor absorvido no processo.

No caso das usinas híbridas com plantas fotovoltaicas, o método baseia-se nas condições de operação dos painéis fotovoltaicos, pois as células fotovoltaicas apresentam desempenho reduzido se expostas a temperaturas elevadas, resultando em redução da eficiência de conversão. Essa característica originou os painéis solares fotovoltaicos térmicos (PVT, do inglês *photovoltaic thermal*), uma tecnologia promissora, na qual um fluido absorve o calor dos painéis, mantendo a temperatura próxima a seu ponto operacional mais eficiente, e o calor absorvido é recuperado e aproveitado em outro processo que utilize energia térmica; é, no entanto, limitado a aplicações térmicas de baixa temperatura, inferiores a 100 °C (Powell *et al.*, 2017).

A usina Noor Energy 1 (dados na tabela 2) é um exemplo de usina híbrida CSP e fotovoltaica. Atualmente está na quarta fase de implantação do projeto híbrido de 950 MW e se localiza no parque solar Mohammed Bin Rashid Al Maktoum. É a maior usina de energia solar concentrada em um único local do mundo, utiliza torre central e calha parabólica na planta de energia solar concentrada de 700 MW. A usina fotovoltaica de 250 MW complementa o projeto. A usina apoiará a estratégia denominada Dubai Clean Energy 2050, para aumentar a participação de energia limpa em Dubai para 25% até 2030, e permitirá uma economia de 1,6 milhão de toneladas de CO₂ (ACWA, 2020; SolarPaces, 2020).

Em síntese, como vantagens das plantas híbridas CSP e fotovoltaicas, podem-se citar o uso benéfico da energia térmica desperdiçada, a remoção térmica de calor (que aumenta a eficiência fotovoltaica) e o potencial para geração de energia totalmente renovável. Quanto às desvantagens, requer dissipador de calor para energia térmica e trata-se de uma fonte de energia não despachável (Powell *et al.*, 2017).

3.3 Usinas de CSP e gás natural

Segundo Powell *et al.*, (2017), o gás natural é o combustível frequentemente utilizado nas usinas de CSP híbridas, tanto que é considerado como combustível de transição, porque fornece confiabilidade, baixo custo e disponibilidade comparado a outros combustíveis fósseis, além de apresentar emissões de CO₂ menores que o carvão mineral.

Como as turbinas a gás operam a temperaturas significativamente mais altas do que as turbinas a vapor, a injeção de calor através da energia solar requer temperaturas mais altas (geralmente acima de 1.000 °C), o que apresenta alguns desafios técnicos na etapa de coleta. No entanto, ao substituir o calor de alta temperatura que normalmente é fornecido pelo gás natural, o conceito de turbina a gás auxiliada por energia solar tem potencial de obter altas participações solares, enquanto outras configurações, como a geração de vapor solar na parte traseira de uma usina de ciclo combinado, sempre dependerá do combustível fóssil como fonte primária de calor (Powell *et al.*, 2017).

As usinas integradas de ciclo combinado solar (ISCC, do inglês *integrated solar combined cycle*) reduzem os custos de energia solar térmica em 35 a 40% em comparação com a tecnologia CSP autônoma (Powell *et al.*, 2017). Além disso, têm um potencial significativo para reduzir ainda mais as emissões de CO₂ provenientes da eliminação de gás natural, pois muitas usinas de gás natural operam em áreas com alto DNI, como Austrália, África, Índia, Península Arábica ou Estados Unidos (Peterseim *et al.*, 2013).

Na Argélia, há uma usina CSP integrada com ciclo combinado (ISCC), denominada ISCC Hassi R'Mel (dados na tabela 2). A usina combina uma planta CSP de calha parabólica de 25 MW, cobrindo uma área de 64 ha, com uma usina de turbina a gás de ciclo combinado de 130 MW, reduzindo-se assim as emissões de carbono em comparação com uma estação térmica de combustível não renovável. Essa planta foi desenvolvida pela New Energy Algeria (SolarPaces, 2020).

No quadro 3, enumeram-se as vantagens e desvantagens da utilização híbrida CSP e gás natural (Powell *et al.*, 2017).

QUADRO 3

Vantagens e desvantagens de usinas híbridas de CSP e gás natural

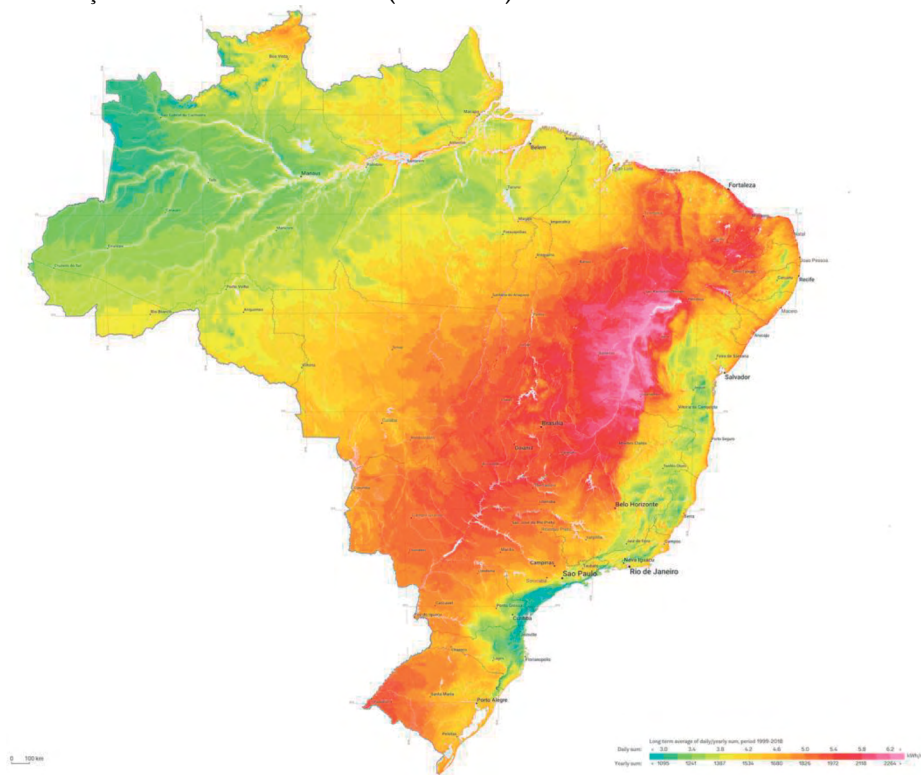
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo, combustível com grande disponibilidade - Combustível não renovável de baixa emissão - Diversas configurações possíveis - Muitos pontos de injeção possíveis para energia solar - Possível operação ISCC eficiente - Despachabilidade - Economia de custos de capital com equipamentos compartilhados 	<ul style="list-style-type: none"> - A tecnologia solar de alta temperatura ainda precisa de desenvolvimento - ISCC eficiente tem participação solar relativamente baixa

Fonte: Powell *et al.* (2017).

Elaboração do autor.

4 CENÁRIO BRASILEIRO

O Brasil possui uma faixa de irradiação normal direta de 3,01 a 6,22 kWh/m² por dia. O maior potencial está localizado na bacia do rio São Francisco e nas áreas de Sobradinho, no Nordeste, além do norte de Minas Gerais e parte da região Centro-Oeste. Observando-se a figura 1, percebe-se a grande incidência de DNI em todo o país, com diversos locais possuindo uma incidência anual maior que o limiar proposto para a utilização da tecnologia CSP (2.000 kWh/m²/ano = 5,48 kWh/m²/dia), afirmando-se o potencial brasileiro para a inserção da heliotermia (Solargis, 2020; SolarPaces, 2020).



Fonte: Solargis (2020).

Obs.: Figura reproduzida em baixa resolução em virtude das condições técnicas dos originais (nota do Editorial).

Pesquisando a base de dados do Atlas Solar Global (Solargis, 2020), destacam-se os municípios de Remanso ($09^{\circ}37'04''\text{S}$, $42^{\circ}04'59''\text{W}$), com DNI de $2.540 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$, e Pilão Arcado ($10^{\circ}00'02''\text{S}$, $42^{\circ}28'47''\text{W}$), com $2.386 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$, ambos no estado da Bahia. Em Minas Gerais, o município de Januária ($15^{\circ}29'15''\text{S}$, $44^{\circ}21'40''\text{W}$) apresenta DNI de $2.197 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$, e Itacarambi ($15^{\circ}06'00''\text{S}$, $44^{\circ}05'32''\text{W}$), $2.218 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$. Além disso, esses municípios têm excelentes condições topográficas, e grandes áreas terrestres estão disponíveis para aplicações solares térmicas (Solargis, 2020; SolarPaces, 2020).

4.1 Projetos de usinas heliotérmicas no Brasil

No Brasil, ainda não existem sistemas heliotérmicos comerciais para a produção de energia elétrica; no entanto, existem aplicações voltadas para a geração de calor de processo para a indústria de alimentos. Como exemplo, tem-se a empresa multinacional Kraft Foods, localizada no município de Vitória de Santo Antão ($8^{\circ}08'20.6''\text{S}$, $35^{\circ}20'12.0''\text{W}$), em Pernambuco, com DNI de $1.552 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$. O sistema em questão possui um campo solar com calhas parabólicas para fornecer água pressurizada a temperaturas de 110°C (Bezerra, 2017).

Bezerra (2017) e Costa *et al.* (2017) destacam três projetos em desenvolvimento no Brasil, localizados nos estados de São Paulo, Rio Grande do Norte e Pernambuco. O projeto em São Paulo é no município de Pirassununga, cuja região apresenta níveis de DNI de $2.065 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$, e ocupará uma área de $0,7 \text{ ha}$. A planta consiste em duas torres solares, cada uma com 100 kW de potência instalada, que serão utilizadas para fornecer energia elétrica e térmica para atividades agroindustriais de laticínios e matadouro. A planta será utilizada para atividades de pesquisa e desenvolvimento, pertence à Universidade de São Paulo (USP) e faz parte do projeto Smile (Sistema Solar Híbrido com Microturbina para Geração de Eletricidade e Cogeração de Calor na Agroindústria).

O projeto no Rio Grande do Norte localiza-se no município de Caiçara do Rio dos Ventos, o DNI da região é de $1.999 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$. A planta utilizará torre solar, ocupará 1 ha e terá 75 helióstatos. O projeto consiste em uma planta comercial de propriedade da Solinova, empresa *spin-off* surgida na USP, em 2008, para desenvolver tecnologia nacional de geração hibridizada de energia elétrica e térmica em alta temperatura (Costa *et al.*, 2017).

O projeto na cidade de Petrolina, Pernambuco, consiste em uma plataforma de pesquisa no Semiárido brasileiro. O projeto prevê uma planta de calhas parabólicas e capacidade instalada de 1 MW, e é executado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) e pela Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF). O projeto pretende inserir a tecnologia solar no mercado brasileiro e avaliar o potencial da região Nordeste (Bezerra, 2017).

4.2 Potencial para aproveitamento híbrido de CSP e biomassa no Brasil

O Brasil é caracterizado por uma grande diversidade de fontes primárias de energia; para a alimentação de usinas térmicas, o país possui em sua matriz disponibilidade de combustíveis renováveis e não renováveis. Dessa forma, o potencial de utilização desses combustíveis integrados a usinas CSP deve ser considerado e estudado. As usinas termelétricas conectadas na rede básica constituem 40,52 GW de carga instalada. Considerando-se as usinas de geração distribuída, o Brasil possui 244 unidades consumidoras com geração de energia elétrica a partir de fontes térmicas; os combustíveis utilizados são biogás, bagaço de cana, gás natural, resíduos florestais e casca de arroz. Na tabela 3, apresenta-se a distribuição dessas usinas por região, totalizando 72,43 MW de potência instalada (Brasil, 2019; Aneel, 2020).

TABELA 3
Usinas térmicas de geração distribuída (jun. 2020)

Região	Quantidade	Potência instalada (kW)
Norte	4	2.194
Nordeste	7	5.973,18
Centro-Oeste	35	14.083,62
Sul	48	17.271,62
Sudeste	150	32.912,12
Total	244	72.434,54

Fonte: Aneel (2020).
Elaboração do autor.

Entre os projetos de geração distribuída da tabela 3, pesquisamos dois exemplos para enfatizar o potencial de projetos de CSP híbridos no Brasil: o primeiro em Minas Gerais, no município de Inimutaba (18°43'49"S, 44°21'45"W), que apresenta DNI de 1.981 kW/m²/ano e possui dois projetos de geração distribuída com biogás de 75 kW cada; e o segundo no estado de Goiás, na cidade de Formosa (15°32'57"S, 47°19'48"W), que apresenta DNI de 2.000 kW/m²/ano e possui uma usina para geração própria de 4 MW em uma unidade consumidora industrial, utilizando biomassa de cana-de-açúcar.

No entanto, Soria *et al.* (2015) afirmam que a produção de energia elétrica utilizando CSP ainda não é possível no Brasil, devido aos altos custos de capital da tecnologia e à falta de uma indústria local. Para atingir a viabilidade, os autores inferem que os elevados valores de DNI e a disponibilidade de biomassa local de baixo custo no Nordeste semiárido do Brasil devem ser considerados. Sugerem a possibilidade de desenvolver uma indústria de CSP capaz de fornecer componentes de baixo custo sob uma estrutura de programa nacional, incluindo os benefícios de emprego local e geração de renda. Para validar as inferências, projetaram e simularam a implantação de dez plantas híbridas de CSP e biomassa de 30 MW cada, que resultariam em 760 empregos diretos e indiretos durante os 24 meses de construção da planta, e aproximadamente 2.100 empregos anuais associados à operação e manutenção das unidades geradoras, além de gerar renda local adicional da ordem de US\$ 57 milhões (Soria *et al.*, 2015).

4.3 Perspectivas e desafios

Segundo o relatório da CGEE (2017), a energia solar térmica deverá ter uma participação discreta na matriz energética nacional até 2050, não passando de 1% dos 400 GW a 480 GW de capacidade instalada prevista para 2050. E indicam para um cenário de médio prazo, horizonte 2030, esforços para desenvolver tecnologia nacional para a produção de espelhos eficientes com baixo custo e com refletividade acima de 96%; desenvolver a produção de trocadores de calor para sistemas heliotérmicos, receptores lineares, pontuais, Fresnel, evaporadores e condensadores; desenvolver tecnologia de armazenamento de energia integrada a sistemas heliotérmicos.

De acordo com Bezerra (2017), entre as barreiras mais significativas identificadas na tecnologia heliotérmica encontram-se as condições de financiamento e o custo de investimento. Tornam-se imprescindíveis políticas públicas e investimentos específicos para o desenvolvimento da tecnologia, em função de os custos da energia oriunda de tecnologias CSP ainda não serem competitivos, quando comparados com as tecnologias convencionais. Nesse sentido, sistemas compensatórios podem ser um caminho para o Brasil, pois são a principal ferramenta para a promoção de CSP, sobretudo na Espanha, onde contam com leilões competitivos e investimentos diretos de recursos públicos, objetivando a redução efetiva de custos (Bezerra, 2017).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil apresenta valores de DNI superiores a 2.000 kW/m²/ano – com destaque para as regiões Nordeste, Centro-Oeste, e para o norte de Minas Gerais –, além de produzir grandes quantidades de diversos tipos de biomassa. Desse modo, a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias CSP e biomassa devem ser incentivados.

É recomendável a construção de uma planta CSP híbrida de referência no Brasil, considerando-se valores de DNI, disponibilidade de biomassa, biogás, gás natural, entre outras fontes primárias, bem como processos produtivos com demanda de energia térmica e elétrica, com destaque para as atividades agroindustriais. Pode-se considerar como referência os projetos Borges Termosolar, na Espanha, e MINOS, na Grécia.

Nos estudos e simulações para planejamento energético, sugere-se analisar a utilização de usinas CSP com armazenamento, pois estas podem contribuir para o equilíbrio da operação de sistemas elétricos interligados com elevada participação de fontes intermitentes.

Para sistemas fotovoltaicos, convém analisar as aplicações de células PVT, mesmo em ambientes urbanos, em aplicações que utilizem energia térmica, como caldeiras em instalações hospitalares.

Como ações de longo prazo, é lícito considerar o incentivo da criação de cadeia produtiva nacional de equipamentos para usinas heliotérmicas.

REFERÊNCIAS

- ACWA. **ACWA Power**. Disponível em: <<https://www.acwapower.com/en/projects/noor-energy-1/>>. Acesso em: 7 jul. 2020.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Geração distribuída**: unidades consumidoras com geração distribuída. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Estadual.asp>. Acesso em: 13 jul. 2020.
- BEZERRA, P. **Energia solar concentrada**: simulação do desempenho de heliostatos de pequeno porte. Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 2017.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional 2019**: ano base 2018. Empresa de Pesquisa Energética, 2019.
- CGEE – COMITÊ GESTOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica**: evolução tecnológica nacional no segmento de geração de energia elétrica e armazenamento de energia. v. 3. Brasília: [s.n.], 2017.
- COSTA, M. *et al.* **Guia de licenciamento ambiental de heliotérmicas**: subsídios para avaliação de impacto ambiental. Brasília: GIZ, 2017.
- GHADI, M. *et al.* A review on the development of concentrated solar power and its integration in coal-fired power plants. In: IEEE PES INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES ASIA, 2019, Chengdu, China. **Anais... IEEE**, 2019.
- ISLAM, M. T. *et al.* A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) T technologies: current status and research trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, 2018.
- NUR ENERGIE. **Nur energie**. Disponível em: <<http://www.nurenergie.com/index.php/english/projects/greece>>. Acesso em: 13 jul. 2020.
- PETERSEIM, J. *et al.* Concentrated solar power hybrid plants, which technologies are best suited for hybridisation? **Renewable Energy**, v. 57, 2013.
- _____. Solar tower-biomass hybrid plants – maximizing plant performance. **Energy Procedia**, v. 49, 2014.

POWELL, K. *et al.* Hybrid concentrated solar thermal power systems: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, 2017.

SOLARGIS. **Mapa de recursos solares**: irradiação normal direta – Brasil. 19 maio 2020.

SOLARPACES. **Solar thermal electricity global outlook 2016**. [s.l.]: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.solarpaces.org/publications-and-reports/>>. Acesso em: 29 jun. 2020.

_____. **SolarPaces**: solar power and chemical energy systems. Disponível em: <<https://www.solarpaces.org/>>. Acesso em: 15 jun. 2020.

SORIA, R. *et al.* Hybrid concentrated solar power (CSP) – biomass plants in a semiarid region: a strategy for CSP deployment in Brazil. **Energy Policy**, v. 86, 2015.

Ipea – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

EDITORIAL

Coordenação

Reginaldo da Silva Domingos

Assistente de Coordenação

Rafael Augusto Ferreira Cardoso

Supervisão

Camilla de Miranda Mariath Gomes

Everson da Silva Moura

Editores

Aeromilson Trajano de Mesquita

Cristiano Ferreira de Araújo

Danilo Leite de Macedo Tavares

Herlyson da Silva Souza

Jeovah Herculano Szervinsk Junior

Leonardo Hideki Higa

Capa

Danielle de Oliveira Ayres

Flaviane Dias de Sant'ana

*The manuscripts in languages other than Portuguese
published herein have not been proofread.*

Livraria Ipea

SBS – Quadra 1 – Bloco J – Ed. BNDES, Térreo

70076-900 – Brasília – DF

Tel.: (61) 2026-5336

Correio eletrônico: livraria@ipea.gov.br

Missão do Ipea

Aprimorar as políticas públicas essenciais ao desenvolvimento brasileiro por meio da produção e disseminação de conhecimentos e da assessoria ao Estado nas suas decisões estratégicas.

ipea Instituto de Pesquisa
Econômica Aplicada

MINISTÉRIO DA
ECONOMIA

