

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR UMA TORRE SOLAR NO BRASIL: SUSTENTABILIDADE, BENEFÍCIOS PARA O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SOCIAL

Bruna Crasnojan Chicano

Joseph Harari

RESUMO

A necessidade cada vez maior por energia tem levado a uma busca crescente por novas maneiras de geração. No Brasil, até há pouco tempo, essa busca parecia estar sob controle, principalmente devido à diversidade de sua matriz de oferta de energia elétrica, preponderantemente constituída por energia de hidroelétricas e termelétricas. Embora apresente um baixíssimo índice de emissão de gases causadores do efeito estufa (GEE), as usinas hidroelétricas causam grande impacto social e ambiental nas regiões onde são construídas. Grandes áreas são inundadas, causando danos quase sempre irreversíveis à fauna e à flora locais. Petróleo, carvão e gás natural são combustíveis fósseis caracteristicamente impactantes ao meio ambiente, ou seja, são não renováveis, são altamente poluentes (o gás natural em menor grau), em especial no que tange às emissões de GEE à atmosfera – tanto nos processos de exploração e produção quanto no que se refere ao consumo. Além da

emissão de gases nocivos e causadores do efeito estufa, a degradação ambiental já começa com sua coleta, na retirada desse material da natureza. Todas essas circunstâncias apontam para o fato de que, mais importante do que encontrar novas soluções para o problema energético, é preciso encontrar soluções sustentáveis e de longo prazo, que não prejudiquem o meio ambiente e seus ecossistemas e que ainda tragam possibilidade de avanço em prol de mais justiça social, econômica e ambiental. O objetivo deste trabalho foi estudar e avaliar a possibilidade da inserção de uma nova maneira de geração de energia sustentável no Brasil que, além de não agredir o meio ambiente, impulsiona enormemente o desenvolvimento social regional – trata-se da Torre Solar (usina termosolar). Essa alternativa de geração de energia é analisada no escopo do desenvolvimento do Brasil sob a égide da transição energética e da correlata descarbonização da economia. Este trabalho é resultado de uma pesquisa de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente (PROCAM) do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEEUSP).

Palavras-chave: Torre Solar no Brasil; Sustentabilidade; Energia Renovável; Mudanças Climáticas; Geração de Energia no Nordeste Brasileiro.

1. INTRODUÇÃO

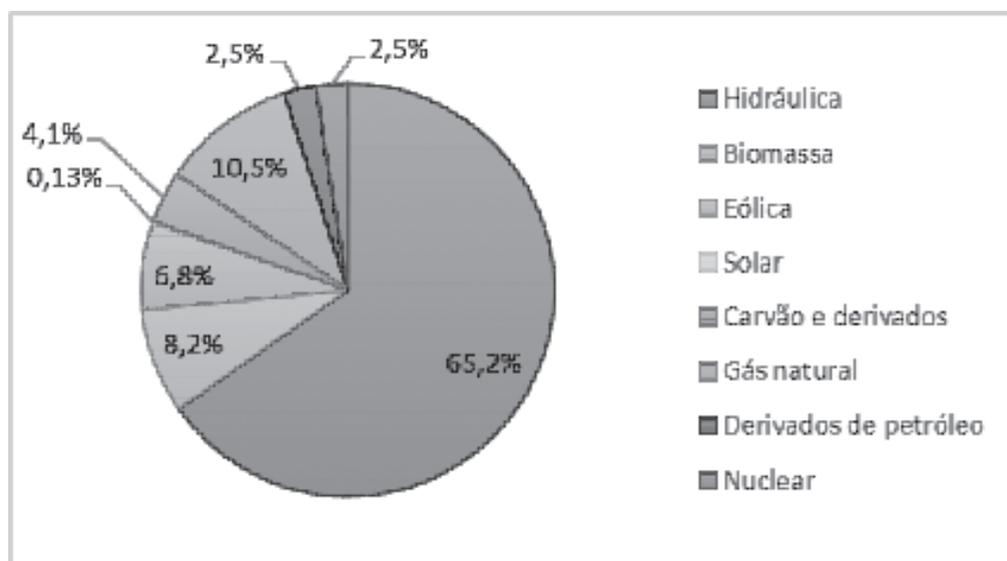
No mundo em que vivemos, a dependência pelo uso de energia elétrica tende a aumentar cada vez mais, e o aumento dessa demanda traz consigo algumas indagações. Há recursos naturais suficientes para acompanhar a demanda de exploração? Quão resiliente é o meio ambiente para, além de acompanhar e suprir o aumento da demanda, se recompor? É viável continuar utilizando os tipos de tecnologia tradicionais para extração e aproveitamento desses recursos? O que pode ser feito a respeito? Os planejamentos energéticos são ferramentas eficientes, que garantem a geração de energia sustentável?

Este capítulo trata da dissertação de mestrado “Geração de energia elétrica por uma torre solar: sustentabilidade, benefícios para o meio ambiente e desenvolvimento social”, defendida no PROCAM, em 2019 (CHICANO, 2019). Essa pesquisa envolve o estudo da viabilidade da Torre Solar como uma alternativa energética no Brasil, com o intuito principal de oferecer uma possibilidade de uma nova fonte para a geração de energia elétrica que contemple o desenvolvimento social e o respeito ao meio ambiente.

1.1. Setor energético brasileiro

Segundo dados do Balanço Energético Nacional 2018, realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e fornecido pelo Ministério de Minas e Energia (MME), o Brasil dispõe de uma matriz elétrica, de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica, que responde por 65,2% da oferta interna (Figura 1). As fontes renováveis representam 80,4% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional e às importações, que são essencialmente de origem renovável (BEN, 2018).

Figura 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil.



Fonte: EPE (2018).

A partir dos dados da Figura 1, é possível notar que as energias solar e eólica somadas correspondem a aproximadamente 7% da oferta interna de energia elétrica no Brasil. Já a oferta interna de energia por combustíveis fósseis soma um montante de 19,6%.

É válido destacar que, enquanto a matriz de oferta interna de energia – ou matriz energética – representa o conjunto de fontes de energia extraídas da natureza em sua forma primária, podendo ser transformada para diversas aplicações, a matriz de oferta de energia elétrica – ou matriz elétrica – é constituída pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica. Dessa forma, a matriz elétrica é parte da matriz energética (EPE, 2019).

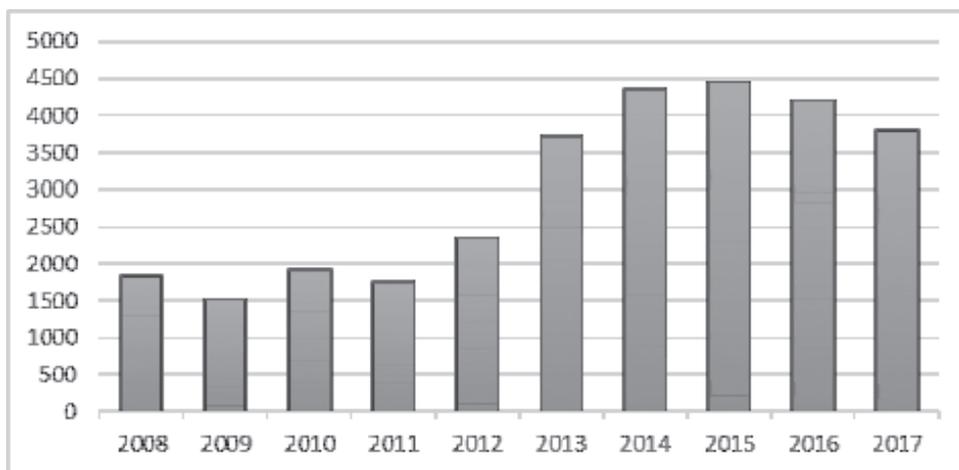
1.2. Consumo de combustíveis fósseis para geração de eletricidade

No ano de 2017, houve um aumento considerável na participação do gás natural para geração de energia elétrica, respondendo a uma maior demanda das termelétricas, que foram a principal fonte de apoio e complementaram a geração hídrica no Brasil, uma vez que a crise hídrica prejudicou a geração de energia elétrica.

Em 2017, o gás natural destinado à geração de energia elétrica alcançou na média 40,1 milhões m³/dia, representando uma expansão de 15,3% ante 2016, atingindo o patamar de 65,6 TWh (BEN, 2018).

Em relação ao carvão, na geração elétrica, o utilizado é o carvão vapor, predominantemente de origem nacional, cujos estados produtores são Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A Figura 2 mostra a evolução do uso do carvão vapor nas usinas termelétricas ao longo de 10 anos.

Figura 2 – Consumo de carvão vapor para geração termelétrica, em milhares de tep (toneladas equivalentes de petróleo).



Fonte: adaptado de EPE (2018).

No Brasil, existe ainda o consumo de lenha para geração de energia elétrica. No ano de 2017, cerca de 1.267.000 toneladas equivalentes de petróleo de lenha (de uma produção de 75.561.000 tep) foram destinados à queima para geração de termelétricidade.

No Brasil, as usinas termelétricas têm uma principal função dentro do Sistema Interligado Nacional: dar suporte para suprir a demanda por energia quando a oferta de origem hídrica está em período de escassez. Portanto, o objetivo operacional com a utilização das termelétricas é garantir o suprimento contínuo pela demanda

de energia elétrica, a partir do manejo do armazenamento dos reservatórios das usinas hidrelétricas.

Segundo dados da EPE, de 2016, o Brasil obteve cerca de 12.388 MW de capacidade instalada em usinas termelétricas, a gás natural. Quanto à geração a partir de carvão mineral, a capacidade de geração termelétrica em operação, atualmente atinge 3,2 GW (EPE, 2019). Pode-se notar que há uma proeminência desse tipo de geração na região sul do Brasil, que soma, ao todo, sete usinas.

1.3. Impactos sociais e sustentabilidade

O principal plano real de contingência, para a escassez das fontes hídricas no Brasil é o acionamento das usinas termelétricas e sua inserção no Sistema Integrado Nacional (SIN).

Do início da década de 1990 para os últimos anos, houve uma alteração na matriz elétrica brasileira, e isso se explica, por um lado, pelo notável aumento da geração por meio de fontes renováveis não hídricas, que nos últimos anos ganharam competitividade frente a fontes mais tradicionais. As usinas eólicas, apesar de sua intermitência de operação (a geração depende da ocorrência de ventos), tiveram um crescimento de 4.000% da potência instalada total em apenas dez anos (de 2007 a 2016), puxando o crescimento das renováveis. Por outro lado, as recentes condições climáticas e hidrológicas desfavoráveis têm causado a diminuição do volume de água armazenado nos reservatórios de hidroelétricas, comprometendo, assim, a capacidade de geração dessas usinas. Para continuar a suprir a demanda por eletricidade, foi necessário o acionamento de térmicas a combustíveis fósseis, o que, conseqüentemente, elevou a intensidade de carbono atrelada à geração de eletricidade (especialmente entre 2011 e 2014) (SEEG, 2019).

No entanto, com a ocorrência do aquecimento global, agravando as mudanças climáticas em todo o globo, como é possível julgar confiáveis as previsões feitas pelo homem, ainda que realizadas por meio dos melhores métodos possíveis, utilizando-se os melhores modelos e recursos disponíveis?

Os planejamentos seguem um padrão histórico e são realizados a partir do que foi verificado nos anos precedentes. No entanto, é questionável a utilização de um padrão, ainda que essa seja a única ferramenta disponível. Fato é que o aquecimento global tem trazido eventos cada vez mais extremos, e é arriscado considerar os modelos apresentados até o presente como base ou padrões confiáveis, a partir dos quais serão realizadas previsões de comportamento natural.

Pode-se pensar num processo de forma cíclica em que se tem: a crise hídrica requer geração térmica de energia, que provoca emissão de gases, que causa

mudanças climáticas, que afeta o ciclo de chuvas, que acentua a crise hídrica, e assim sucessivamente.

O Plano Decenal de Expansão de Energia 2024, por exemplo, cita que foram realizados estudos socioambientais baseados no conceito de sustentabilidade, visando a redução dos impactos ambientais e/ou sociais tanto na escala local quanto na escala global, no que diz respeito à expansão do sistema de energia (MME, 2015).

Apesar de serem destacados o crescimento e a introdução das energias renováveis na matriz energética nacional, o paradoxo se forma quando se mantém a expansão de usinas termelétricas, ainda que o combustível destas seja carvão.

Além da emissão de poluentes, o custo para a operação das termelétricas varia de acordo com o valor do combustível a ser utilizado, sofrendo impacto tanto da economia nacional quanto da internacional.

O relatório Plano Nacional de Energia 2030 também cita algumas alternativas para contribuir com a redução da emissão de gases responsáveis pelas mudanças climáticas. No entanto, nesse relatório se ressalta que a escolha de alternativas depende da disponibilidade de recursos, além de definições regulatórias e institucionais (PNE, 2007). O Plano Decenal de Energia 2027 considera o carvão como fonte para novas usinas, listando duas principais dificuldades, uma ambiental e a outra financeira. Em relação à “dificuldade ambiental”, o relatório cita a possibilidade de novas usinas a carvão, que apresentem maior eficiência energética e um maior controle sobre a emissão de poluentes.

Ainda no Plano Nacional de Energia 2030, nota-se que a energia solar não é considerada como uma das principais alternativas para o atendimento da demanda, e não há indicativo de que essa fonte é prioritariamente considerada no plano de expansão.

É mencionado no Plano Decenal de Energia 2027 que o Brasil dispõe de grande potencial energético, considerando-se os potenciais hidráulico, eólico, de biomassa e solar; esses, por sua vez, fazem frente ao crescimento da demanda por eletricidade de maneira segura, econômica e mantendo o respeito à legislação ambiental.

No entanto, a oferta indicativa leva em consideração a necessidade energética, o custo para implantação e operação de cada fonte e os prazos estimados para entrada em operação das usinas a serem contratadas nos leilões futuros (PDE, 2027, 2018).

Assim, de todos os parâmetros considerados para a expansão do setor energético e elétrico, visando suprir o crescimento da demanda no país, o fator econômico mostra-se como o mais significativo.

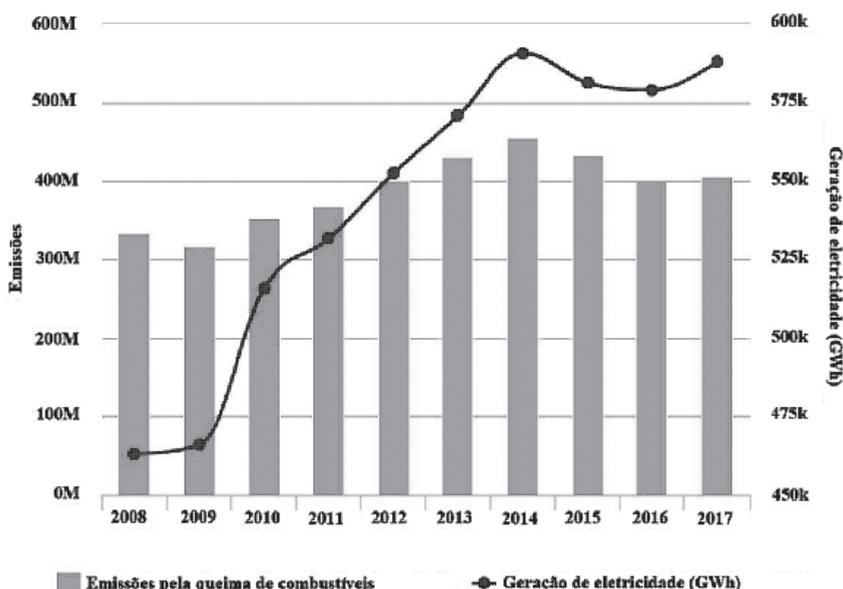
1.4. Geração de energia e o aquecimento global

Comparativamente, a intensidade de carbono emitida na geração de energia elétrica no Brasil é menor do que na Europa, nos Estados Unidos e na China, por exemplo. Para produzir 1 MWh, o setor elétrico brasileiro emite 2,9 vezes menos que o europeu, 3,7 vezes menos que o setor elétrico americano e 5,8 vezes menos que o chinês (BEN, 2019).

Desde 1950, são observadas mudanças sem precedentes no período de décadas ou até mesmo milênios: a atmosfera e o oceano aqueceram, as camadas de gelo e neve diminuíram e o nível dos oceanos subiu. Caso as emissões de gases de efeito estufa (GEE) sigam em elevação nas taxas atuais, a temperatura do planeta poderá aumentar 5,4 °C até 2100 (EMBRAPA, 2018).

A Figura 3, fornecida pela SEEG, contempla emissões de CO₂ pela queima de combustíveis fósseis, incluindo gás natural, carvão e óleo diesel/combustível, com aplicação nas centrais elétricas autoprodutoras e de serviço público, associadas à geração de eletricidade no SIN no período de 2008 a 2017.

Figura 3 – Emissão de CO₂ associada à geração de energia elétrica.



Fonte: SEEG (2019).

Os possíveis cenários previstos de aquecimento global indicam a crescente vulnerabilidade dos sistemas agrícolas que, associada ao aumento da demanda mundial por alimentos, água e energia, representa um enorme desafio para a sustentabilidade da produção, dos ecossistemas terrestres e aquáticos e dos serviços à sociedade. Um estudo utilizando um cenário de aumento de 3 °C até 2050 identificou que, nessa situação, o Brasil teria como impacto uma redução de até 50% na produção agrícola (EMBRAPA, 2018).

1.5. Torre solar como alternativa

O conceito da “Solar Tower” surgiu pela primeira vez no início do século XX, quando foi publicado um artigo científico na revista espanhola “La Energía Eléctrica”, em 25 de agosto de 1903, intitulado “Proyecto de motor solar”.

Quase 80 anos depois da publicação do artigo, em 1981, a empresa de engenharia alemã Schlaich Bergermann and Partner, baseando-se no conceito proposto por Cabanyes, projetou e construiu, em parceria com a companhia elétrica espanhola Unión Fenosa, um protótipo da Torre Solar na cidade de Manzanares (cerca de 150 km ao sul de Madrid, na Espanha) com financiamento do Ministério Federal de Pesquisa e Tecnologia da Alemanha (Bundesministerium für Forschung und Technologie – BMFT).

A Torre Solar nada mais é do que uma usina de energia solar e é formada, basicamente, pelos três elementos citados em 1903 por Cabanyes: o coletor solar (“telhado de vidro”), a chaminé (tubo cilíndrico vertical) e turbinas.

Todo o funcionamento da Torre Solar tem como foco principal sua fonte: o sol, utilizando-se de dois fenômenos principais, que partem de princípios físicos: o efeito estufa e o efeito chaminé (Figura 4).

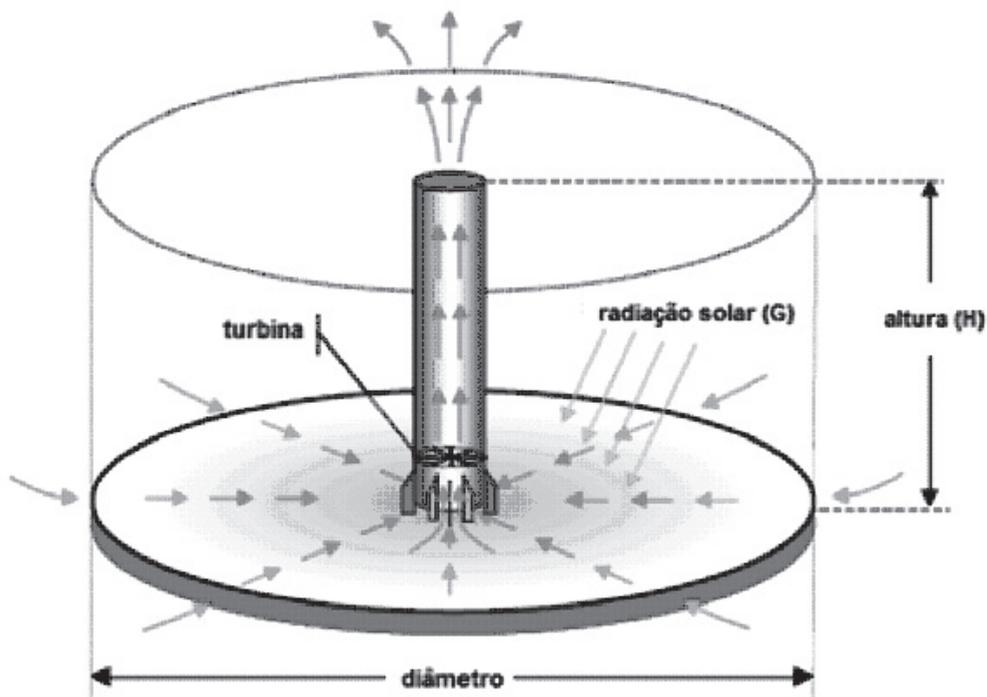
O fluxo de ar que entra ou sai de um ambiente, de modo geral, depende da diferença de pressão do ar entre os ambientes interno e externo. Essa diferença de pressão deve-se a inúmeras razões, e uma delas é a diferença que há na densidade do ar, e essa, por sua vez, é causada pela diferença de temperatura entre o ar interno e externo. Essa diferença de temperatura é o que causa o chamado “efeito chaminé”: o ar interno tende a sair do ambiente pelos orifícios mais altos, enquanto o ar externo penetra no ambiente pelos orifícios mais baixos.

O vidro transparente, material utilizado no “telhado” da Torre Solar, é transmissor de radiação. No entanto, quando as ondas eletromagnéticas atravessam o vidro, entram em contato com o solo e são absorvidas, gerando um aumento de temperatura no ambiente. Esse é o efeito estufa: ao irradiarem através do vidro, grande parte dos raios luminosos oriundos do sol são absorvidos pelo solo, gerando

calor; portanto, o ar embaixo do “telhado de vidro” é aquecido com a radiação solar. O solo e o telhado de vidro, juntos, funcionam como um coletor de ar.

A parte superior do coletor (o telhado) consiste em um vidro ou vidraças de plástico rígido esticadas horizontalmente alguns metros acima do solo. A altura da vidraça aumenta adjacente à base da torre, de modo que o ar é desviado para um movimento vertical, com o mínimo de perdas por atrito. Essa vidraça permite que a radiação solar penetre e retenha o calor a partir da absorção pelo solo. Assim, o solo sob o coletor esquenta e transfere o seu calor para o ar, que flui radialmente para cima, para o exterior da torre (SCHLAICH; BERGERMANN, 2011).

Figura 4 – Princípio de funcionamento da Torre Solar.



Fonte: Schlaich e Bergermann (2011).

Segundo Schlaich e Bergermann, as turbinas estão presentes em toda a base da torre, no centro do coletor de ar. Por meio da corrente de ar, é gerada energia mecânica rotacional. As turbinas utilizadas na Torre Solar não funcionam com velocidade gradativa, que cresce ou decresce passo a passo. A pressão estática é convertida em energia rotacional por meio de turbinas revestidas, de modo similar ao que ocorre numa usina hidrelétrica, por exemplo. A potência específica (energia

por área varrida pelo rotor) da turbina na torre é aproximadamente uma ordem de grandeza maior que a velocidade de uma turbina eólica.

1.6. Análise geográfica do Brasil

O aproveitamento do recurso energético solar consiste na conversão da energia emitida pelo Sol em energia térmica ou diretamente em energia elétrica (processo fotovoltaico). Além da tecnologia fotovoltaica, a geração de eletricidade por meio de aproveitamento térmico da energia solar também é uma tecnologia em crescimento, liderada pela Espanha e pelos Estados Unidos, que, juntos, representam 80% da capacidade instalada global. Índices elevados de irradiação solar direta na superfície ocorrem em grande parte do Nordeste Brasileiro e são o principal requisito para a viabilidade dessa tecnologia de geração (INPE, 2017).

Analisando a distribuição da irradiação solar global no Brasil, observa-se que todo o território brasileiro recebe elevada irradiação, porém, em geral, abaixo dos níveis necessários para produção de calor a altas temperaturas durante todo o ano. Para isso é necessário um número alto de horas de insolação direta e, com exceção do semiárido nordestino, todas as regiões brasileiras apresentam períodos com alta nebulosidade e chuvas.

De fato, a faixa que vai desde o Nordeste do Brasil, espalhando-se pela região Centro-Oeste e pelo interior da região Sudeste, engloba tanto regiões de forte produção industrial e agrícola quanto áreas densamente povoadas e desenvolvidas economicamente, o que torna o desenvolvimento de novas tecnologias de uso da energia solar bastante interessante (INPE, 2017).

A concentração da energia solar só acontece com a irradiação solar direta. Em geral, locais com uma disponibilidade de irradiação solar anual acima de 2.000 kWh/m² e baixa nebulosidade apresentam esse potencial.

Os melhores locais para implantação de usinas solares térmicas concentradas – Concentrated Solar Power (CSP) – estão no semiárido brasileiro, onde a energia anual atinge 2,2 MWh/m² e as médias de irradiação solar diária são maiores que 5,0 kWh/m²/dia. A região oeste do nordeste brasileiro atende a todos os requisitos técnicos para explorar a energia solar térmica para geração de eletricidade com base na tecnologia de chaminé solar (MARTINS et al., 2012).

2. METODOLOGIA

Por meio de análise geográfica a partir do atlas solarimétrico do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), verificaram-se as regiões que apresentam

as componentes de irradiação solar em todo território nacional, sendo elas: irradiação global horizontal (H), irradiação direta normal (Hn) e irradiação no plano inclinado na latitude (Hi).

Para a construção da Torre Solar, foram considerados, além da irradiação solar anual, a velocidade dos ventos, a distância para as linhas de transmissão, a variação do terreno e o uso atual da terra.

Dessa forma, foi definida a localização para a implantação de um projeto: em sua maior parte, nos estados do Maranhão e do Piauí. A seguir, foram calculados os parâmetros básicos de dimensionamento da Torre Solar, definindo, principalmente, o diâmetro do coletor e a altura da chaminé (torre).

A avaliação socioambiental foi realizada sob duas perspectivas: uma de forma regional e mais centralizada, observando o ambiente e a sociedade diretamente atingidos pela construção de uma usina geradora de energia elétrica, e a outra numa escala macro, avaliando os impactos a níveis nacional e mundial, utilizando dados fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

3. RESULTADOS

3.1. Localização

Valores maiores que 2,2 MWh/m² foram encontrados principalmente no semiárido, região do nordeste brasileiro onde a baixa precipitação e o grande número de dias de céu claro são as principais características climáticas (MARTINS et al., 2012). Além disso, a região nordeste é a área mais favorável para investimentos em usinas solares térmicas concentradas, porque essa região recebe uma alta energia solar cumulativa anual e apresenta pequena variação ao longo do ano. Nessa região, também, existem linhas de transmissão pertencentes ao Sistema Interligado Nacional (SIN) de 230 kV, 440 kV e 550 kV (MARTINS et al., 2012).

A expectativa é que os investimentos totais em transmissão atinjam cerca de R\$ 108 bilhões ao longo do decênio, sendo R\$ 73 bilhões em linhas de transmissão e R\$ 35 bilhões em subestações, incluindo as instalações de fronteira (PDE 2027, 2018).

Sendo assim, a área ideal é localizada, em sua maior parte, nos Estados do Maranhão e do Piauí, reunindo as melhores condições e tendo um grande potencial técnico para a implantação do projeto da Torre Solar. Além disso, também está próxima da rede de distribuição elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN) e

exclui regiões inapropriadas para a aplicação do projeto, representadas por áreas que contêm florestas, reservas ambientais, reservas indígenas, rios e lagos.

3.2. Parâmetros de construção

Os parâmetros básicos de dimensionamento da Torre Solar podem ser calculados definindo, principalmente, o diâmetro do coletor e a altura da chaminé (torre).

Segundo Schlaich et al., a potência de saída da Torre Solar pode ser calculada como a entrada de energia solar – ou fluxo de calor dentro do coletor –, (Q_{solar}), multiplicada pelas eficiências do coletor, da chaminé e da turbina, respectivamente.

$$P = Q_{solar} \cdot \eta_{total} \quad [Eq. 1]$$

A área do coletor pode ser calculada por meio da fórmula a seguir, onde r é o raio do coletor, em metros:

$$A_c = \pi \cdot r^2 \quad [Eq. 2]$$

A entrada de energia solar (Q_{solar}) pode ser calculada como o produto da radiação global horizontal (Gh) e a área do coletor:

$$Q_{solar} = Gh \cdot A_c \quad [Eq. 3]$$

A chaminé converte o fluxo de calor produzido pelo coletor em energia cinética (corrente de convecção) e em energia potencial (queda de pressão na turbina). Dessa maneira, a diferença de densidade do ar causada pelo aumento da temperatura no coletor funciona como força motriz. Força motriz é o produto da massa de um corpo pela sua aceleração, ou seja, é a força do “movimento”.

A coluna de ar “mais leve” dentro da torre está em contato com a atmosfera que existe na base (dentro do coletor de ar) e no topo da torre, fazendo com que o ar se eleve. A diferença de pressão ocorre entre a base da torre, ou seja, na saída do coletor de ar, e o ambiente (SCHLAICH et al., 2011). Ainda segundo Schlaich et al., dessa maneira, a diferença de pressão aumenta conforme a altura da torre.

Seguindo a literatura, pode-se considerar a eficiência do coletor (η_c), a eficiência da turbina (η_t) e a eficiência do gerador elétrico (η_g) como constantes, e equivalem, respectivamente, a 42%, 85% e 80% (B. ALI, 2017).

Além disso, a eficiência da chaminé pode ser calculada a partir da seguinte relação:

$$\eta_{ch} = \frac{g \cdot h}{C_p \cdot T_o} \quad [Eq. 4]$$

onde g representa a constante da aceleração gravitacional ($9,81 \text{ m/s}^2$), h representa a altura da chaminé, C_p é a constante que representa o calor específico do ar a uma pressão constante, de acordo com T_0 , que é a temperatura de entrada do coletor, dada em Kelvin.

A velocidade do ar na chaminé pode ser calculada como:

$$v_{ch} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \frac{\Delta t}{T_0}} \quad [\text{Eq. 5}]$$

onde Δt é a máxima variação de temperatura dentro da chaminé que, segundo a literatura, é de 20 K.

Sendo assim, Cottam et al. (2019), após uma série de estudos, concluíram que plantas menores, com coletores com cerca de 3.000 m de raio, são mais vantajosas em relação a usinas maiores. Ainda, concluiu-se que tanto o diâmetro do coletor quanto a altura e o raio da chaminé são importantes para determinar a performance do sistema. De qualquer forma, o aumento da altura da chaminé sempre resulta no aumento de potência.

Assim, a performance total do sistema pode ser dada por:

$$\eta_{\text{total}} = \eta_c \cdot \eta_{ch} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \quad [\text{Eq. 6}]$$

A produção de eletricidade pode ser calculada por meio da eficiência total do sistema, considerando as eficiências do coletor, da chaminé, da turbina e do gerador elétrico, a área do coletor (A_c) e a radiação global horizontal (G_h).

$$P_e = \eta_{\text{total}} \cdot G_h \cdot A_c \quad [\text{Eq. 7}]$$

A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2018) – calcula que 1 MW de capacidade instalada atenda cerca de 7,5 mil habitantes. Uma usina de 30 MW de capacidade instalada, portanto, é o suficiente para abastecer 225 mil habitantes.

Assumindo um valor da radiação global horizontal de 2.200 kWh/m^2 e seguindo a orientação de Cottam et al., supondo um coletor de 400 m de diâmetro, a área do coletor é calculada como sendo

$$A_c = \pi \cdot (200)^2 = 125.600 \text{ m}^2 \quad [\text{Eq. 8}]$$

A entrada de energia solar é calculada considerando a radiação global horizontal (2.200 kWh/m^2) e a área do coletor:

$$Q_{\text{solar}} = 2200 \cdot 125600 = 276.320 \text{ kWh} \quad [\text{Eq. 9}]$$

Seguindo a literatura, considera-se como padrão, para fins de cálculos, a eficiência do coletor (η_c) como 0,42, a eficiência da turbina (η_t) como 0,85 e a eficiência do gerador elétrico (η_g) como 0,80. Já a eficiência da chaminé é calculada como:

$$\eta_{ch} = \frac{9,81 \cdot h}{1,01 \cdot 302} \quad [\text{Eq. 10}]$$

Considera-se a temperatura de entrada do coletor em torno de 29 °C (302 K, aproximadamente) e o calor específico do ar a uma pressão constante equivale a 1,01 kJ/kg.K.

Assim, pode-se variar a altura da chaminé de modo a determinar a melhor eficiência para o sistema, como demonstrado a seguir.

Considerando a altura da chaminé como 1.000 metros:

$$\eta_{ch} = \frac{9,81 \cdot 1000}{1,01 \cdot 302} = 32\% \quad [\text{Eq. 11}]$$

Considerando a altura da chaminé como 500 metros:

$$\eta_{ch} = \frac{9,81 \cdot 500}{1,01 \cdot 302} = 16\% \quad [\text{Eq. 12}]$$

Considerando a chaminé de 1.000 metros de altura, a velocidade do ar dentro da chaminé pode ser calculada:

$$v_{ch} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1000 \cdot \frac{20}{302}} = 36 \text{ m/s} \quad [\text{Eq. 13}]$$

Considerando a chaminé de 500 metros de altura, a velocidade do ar dentro da chaminé pode ser calculada:

$$v_{ch} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 500 \cdot \frac{20}{302}} = 25 \text{ m/s} \quad [\text{Eq. 14}]$$

A potência de saída pode ser calculada como a entrada de energia solar multiplicada pelas eficiências do coletor, da chaminé e da turbina, respectivamente. Transformando a entrada de energia solar em potência de entrada:

$$2200 \frac{kWh}{m^2 \cdot \text{ano}} = \frac{2200}{365} \frac{kWh}{m^2 \cdot \text{dia}} = 6 \frac{kWh}{m^2 \cdot \text{dia}} \quad [\text{Eq. 15}]$$

$$6 \frac{kWh}{m^2 \cdot dia} \cdot 125600m^2 = 753600 \frac{kWh}{dia} \quad [Eq. 16]$$

$$\frac{753600}{24} \frac{kWh}{h} = 31400kW = 31,4MW \quad [Eq. 17]$$

Considerando a altura de 500 metros da chaminé e sua eficiência de 16%:

$$P = 31.400.000 \cdot 0,05 = 1,57 MW \quad [Eq. 18]$$

Considerando a altura de 1.000 metros da chaminé e sua eficiência de 32%:

$$P = 31.400.000 \cdot 0,09 = 2,83 MW \quad [Eq. 19]$$

Calculando a eficiência do sistema, considerando apenas a eficiência do coletor (η_c) em 42%, a eficiência da turbina (η_t) em 85% e a eficiência do gerador elétrico (η_g) em 80%, desconsiderando a eficiência da chaminé, o sistema apresenta, de acordo com a literatura, uma eficiência inicial de aproximadamente 28,5%.

Os cálculos anteriores mostram a necessidade de se intensificar os estudos acerca do aumento da eficiência dos sistemas em separado, especialmente no que diz respeito à chaminé – ou torre – da usina termosolar.

Existem estudos de engenharia em andamento em diversos países e pesquisas propondo novos modelos matemáticos, principalmente na China. No entanto, apesar de apresentar baixo rendimento, a Torre Solar se mostra funcional e capaz de gerar energia elétrica 100% limpa.

3.3. Avaliação socioambiental e desenvolvimento sustentável

A avaliação socioambiental pode ser realizada sob duas perspectivas: uma de forma regional e centralizada, observando o ambiente e a sociedade diretamente atingidas pela construção de uma usina geradora de energia elétrica; e a outra numa escala macro, avaliando os impactos a níveis nacional e mundial.

A melhor região para receber usinas termossolares está localizada no semiárido nordeste brasileiro, região onde a energia solar acumulada anual alcança 2,2 MWh/m² e a taxa diária de radiação solar é maior do que 5 kWh/m²/dia. Além disso, essa região apresenta um terreno com baixa variação e é banhada pelo rio São Francisco, além da proximidade das linhas de transmissão do SIN. Todos esses fatores contribuem para a viabilidade econômica do projeto (MARTINS et al., 2012).

Ainda segundo Martins et al., a inclinação do terreno nas regiões ideais para a aplicação do projeto deve variar entre 1% e 3%, e o uso da área é, de preferência, para pequenas atividades agrícolas.

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE –, o semiárido brasileiro conta com uma extensão total de 982.563,3 km².

Como reflexo das condições climáticas dominantes de semiaridez, a hidrografia é pobre, em seus amplos aspectos. As condições hídricas são insuficientes para sustentar rios caudalosos que se mantenham perenes nos longos períodos de ausência de precipitações. Constitui-se exceção o rio São Francisco. Devido às características hidrológicas que possui, as quais permitem a sua sustentação durante o ano todo, o rio São Francisco adquire uma significação especial para as populações ribeirinhas e da zona do sertão.

O semiárido brasileiro é formado por 1.133 municípios. A população total da região é de 22,6 milhões de habitantes, o que representa 12% da população brasileira. Uma parcela de 38% da população rural brasileira reside no semiárido. Vivem de pequenos estabelecimentos e têm a agropecuária como principal atividade. Ao longo do ano, de acordo com as safras, os agricultores também coletam espécies nativas para se alimentar, vender ou processar, como uma forma de complementar a renda (MDA, 2019).

Considerando-se que toda a região do semiárido seja habitada, tem-se uma média de 26 habitantes por quilômetro quadrado.

Historicamente, o período de estiagem de oito a nove meses era associado à pobreza da região, sobretudo quando essa estiagem se estendia por dois ou três anos e a população rural desprivilegiada não tinha absolutamente mais nada o que comer e beber. Dessa forma, o período de estiagem passava a ser entendido como problema, associado a catástrofes sociais (TEIXEIRA, 2015). Ou seja, a região do semiárido pode ser considerada como uma região escassa de recursos, que contempla níveis desérticos de solo e abriga uma população sofrida e necessitada.

A construção de um empreendimento como uma usina termosolar na região pode ser vista como uma possibilidade de desenvolvimento regional, de melhor estruturação dos municípios e de envio de mais recursos para a população local.

Entre os anos de 2002 e 2016, municípios como Gentio do Ouro e Tabocas do Brejo Velho, ambos no estado da Bahia, apresentaram avanço e conseqüentemente aumento do PIB, motivados, no primeiro caso, pela indústria de máquinas e equipamentos para a construção de complexos eólicos, e, no segundo caso, devido

ao aumento da arrecadação de impostos de importação de equipamentos para a geração solar, segundo dados do IBGE.

Em relação aos impactos ambientais, quando se analisa a área utilizada para a construção de uma Torre Solar e se compara a uma usina hidroelétrica, por exemplo, pode-se excluir do escopo a enorme e irreversível perda de biodiversidade causada pelas grandes áreas inundadas.

A Torre Solar, como uma fonte de energia ambientalmente aceitável, oferece inúmeras vantagens, como o uso de radiação solar difusa, o que é crucial nos países tropicais, sendo independente de água para resfriamento durante a operação e tornando, assim, sua aplicação adequada para regiões que sofrem de escassez de água; e turbinas e geradores, que são as únicas partes móveis, levam a um baixo custo de operação e manutenção, alta durabilidade e um alto ciclo de vida (P. GUO et al., 2018).

Comparando-se a usinas termelétricas, não há qualquer tipo de emissão de poluentes. Não há extração de matéria prima para a queima de combustível, não há resíduo antes, durante e nem após o processo de transformação de energia.

A maneira como a Torre Solar gera energia não impacta de forma negativa a saúde dos seres humanos, pois ela não emite qualquer tipo de gás. Inclusive, corrobora com a diminuição da emissão de gases de efeito estufa e com as premissas da COP 21 (a 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, também conhecida, na sigla em inglês, como UNFCCC, realizada em 2015) e do correlato Acordo de Paris em prol da mitigação das mudanças climáticas e de seu fenômeno associado mais proeminente, qual seja, o aquecimento global.

4. CONCLUSÕES

A necessidade cada vez maior por energia tem levado a uma busca ininterrupta por novas formas de geração. No Brasil, até poucotempo atrás, essa busca aparentava estar sob controle, principalmente devido à diversidade de sua matriz energética, preponderantemente constituída por energia de hidroelétricas e termelétricas.

Com suas dimensões continentais, o Brasil é um país que usufrui, em determinadas regiões, de altos índices de radiação solar e, conseqüentemente, de altas temperaturas durante todas as estações do ano. Além disso, as principais regiões que acumulam essas características, também apresentam um baixo índice populacional.

O aproveitamento do recurso solar, no Brasil, se apresenta como uma excelente opção para complementação de fontes convencionais de energia já consolidadas, como as hidroelétricas. Esse aproveitamento favorece o controle hídrico nos reservatórios, especialmente nos períodos de menor incidência de chuvas, possibilitando planejamento e otimização de novos investimentos em geração, transmissão e distribuição da energia. Uma estratégia de aproveitamento da geração solar consorciada com a geração hidroelétrica permite antever um possível processo de aumento da renda de algumas das regiões mais pobres do país, como a Região Nordeste, com a promoção de uma economia socialmente justa e menos vulnerável aos efeitos do clima, reduzindo, assim, uma assimetria regional secular de inclusão social e econômica (INPE, 2017).

Em 2011, o grupo responsável pela pesquisa e pelo desenvolvimento do projeto – Schlaich Bergermann und Partner – citou o Brasil, entre outros países, como um potencial produtor de energia solar.

Quanto à mitigação das emissões de CO₂, a torre solar se mostra uma alternativa 100% eficaz, uma vez que não apresenta qualquer emissão de substância danosa ao meio ambiente, seja resíduos sólidos com a queima de combustível, como o carvão, seja a emissão de gases derivados de enxofre, nitrogênio, entre outros, que causam também a acidificação das chuvas, além de problemas de saúde, principalmente na população local.

Segundo dados do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), em 2015 foram emitidas 454 megatoneladas de gases responsáveis pelo efeito estufa no Brasil, sendo que 94,5% do total é composto por CO₂. Cerca de 78,1 megatoneladas, ou 17,2%, é a parcela referente à geração de energia elétrica.

Embora apresente um baixíssimo índice de emissão de gases causadores do efeito estufa, as usinas hidroelétricas causam grande impacto social e ambiental nas regiões onde são construídas. Grandes áreas são inundadas, causando danos irreversíveis à fauna e à flora locais. Portanto, trata-se de um recurso renovável que gera efeitos deletérios irreversíveis ao meio ambiente e nos seres humanos, que o digam as tribos indígenas e as populações ribeirinhas no caso da construção do Complexo de Belo Monte.

As circunstâncias citadas apontam para o fato de que, mais importante do que encontrar novas soluções para o problema energético, deve-se encontrar soluções sustentáveis e de longo prazo, que não prejudiquem o meio ambiente e seus ecossistemas e que ainda tragam possibilidade de avanço e melhoria para a sociedade.

Ainda que toda a análise seja realizada da forma mais assertiva possível, não se pode dizer que os inúmeros planejamentos energéticos, nacionais ou internacionais, estejam mais ou menos próximos de constatar o que de fato irá ocorrer, principalmente quando se utiliza como alternativa um processo poluente e agravante do aquecimento global: a queima de combustíveis para a geração de energia elétrica, a partir das termelétricas, como é o caso do Brasil.

É de suma importância que as matrizes energéticas, a nível mundial, atinjam a descarbonização, fazendo com que a transição energética seja acelerada, uma vez que as premissas sobre as mudanças climáticas exercem um tom dominante de urgência.

A grande oportunidade que há para contrabalançar as incertezas causadas pelas mudanças climáticas, no âmbito energético, é a busca por novas tecnologias de geração e a aplicação da tecnologia existente, utilizando fontes renováveis para seu funcionamento.

Por mais que se invista na conscientização das pessoas e nos pilares da educação formal, além da criação de políticas públicas, é urgente que se invista em pesquisa, em busca de novas formas sustentáveis de geração de energia; mas, ainda mais importante é que se apliquem no cotidiano tecnologias limpas, que não agridam o meio ambiente e a sociedade como um todo.

Além disso, pode-se concluir que os planejamentos existentes, tais quais são hoje, não formam uma ferramenta eficiente de mitigação dos impactos ambientais, uma vez que os fatores econômicos são preponderantes em relação a qualquer outro fator.

Cabe destacar, também, que na indisponibilidade de gás natural, principalmente por eventuais restrições de infraestrutura de oferta, ou em cenários mais restritivos para o aproveitamento de outras tecnologias, a opção pelo carvão mineral pode se apresentar como solução alternativa de expansão (PDE 2027, 2018).

A dimensão da sustentabilidade ambiental sugere que novas estruturas de mercado precisam ser desenvolvidas a fim de permitir a integração bem-sucedida de tecnologias de apoio. Deve-se notar, no entanto, que, embora muitos países estejam cada vez mais desenvolvendo e incorporando políticas de energia limpa, os combustíveis fósseis ainda são uma parte importante da matriz de energia do globo. A participação dos combustíveis fósseis como energia primária mudou apenas 5% nos últimos 45 anos, de 86% em 1970 para 81% em 2014 (WEC, 2018).

Outra maneira de viabilizar o uso da energia solar é usá-la de forma complementar às fontes convencionais. Principalmente no setor industrial, a variabilidade

dessa forma de energia faz com que ela enfrente resistência devido ao uso já consolidado das fontes convencionais. A substituição gradual agrega confiabilidade à energia solar e permite que o setor se aproprie da nova tecnologia com um risco menor, possibilitando que novas alternativas sejam testadas, sem comprometer a viabilidade econômica do processo industrial (INPE, 2017).

A Torre Solar é uma tecnologia sustentável, de energia renovável e de viabilidade e aplicabilidade demonstradas e comprovadas. A Torre Solar demonstra inúmeras vantagens, no entanto alguns desafios ainda precisam ser transpostos antes de sua comercialização. Deve-se investir ainda mais em pesquisa, analisando e desenvolvendo projetos de tecnologia de construção, com novos materiais e conceitos, visando maior eficiência, principalmente da chaminé, que é a parte do sistema que mais tem comprometido a eficiência global, diminuindo o rendimento da Torre Solar. Grosso modo, as fontes atuais de geração de energia ainda se mostram mais eficazes.

Muitos pesquisadores analisaram o fluxo de características do sistema de torre solar e, ainda, alguns deles tentaram melhorar e aprimorar a geração de energia ou a eficiência da usina, propondo modelos matemáticos, simulações numéricas e trabalhos de pesquisa experimental. A maioria desses pesquisadores empregaram modelos matemáticos para estudar partes da usina ou aprimoramentos na eficiência do projeto (AURYBI et al., 2018).

No entanto, é correto afirmar que a Torre Solar desempenha um importante papel na busca por novas fontes de energia e irá atuar de modo ainda mais significativo num futuro próximo, garantindo uma opção tanto ambiental quanto socialmente sustentável para a geração de energia elétrica, tanto no Brasil quanto no mundo.

O Brasil apresenta o clima e o índice de irradiação solar anual, a localização, linhas de transmissão, o solo e a variação do terreno, a velocidade do vento e o espaço demográfico viáveis para a aplicação do projeto no país, mas a Torre Solar ainda exige melhorias para que possa se tornar competitiva com as outras formas de geração de energia.

Inovar é preciso, principalmente quando dessa inovação podem-se criar soluções que trazem o progresso de forma responsável e sustentável, visando o respeito e a conservação do meio ambiente, além de contribuir e proporcionar o desenvolvimento social.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas da Energia – Aspectos Institucionais**. 2018. Brasília, Brasil.

BABKIR ALI. **Techno-economic optimization for the design of solar chimney power plants**. 2017. Alberta, Canada.

BEN – **Balço Energético Nacional 2018**. 2018. MME/EPE – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, Brasil.

BEN – **Balço Energético Nacional 2019**. 2019. MME/EPE – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, Brasil.

CHICANO, B. C. **Geração de energia elétrica por uma torre solar: sustentabilidade, benefícios para o meio ambiente e desenvolvimento social**. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. Orientador: Joseph Harari; Coorientador: João D. T. Arruda Neto. São Paulo, 2019, 80 p.

COTTAM, P. J.; DUFFOUR, P.; LINDSTRAND, P.; FROMME, P. **Solar chimney power plants – Dimension matching for optimum performance**. 2019. Londres, Reino Unido.

EMBRAPA. **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira**. 2018. Brasília, Brasil.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Sistema de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro**. Disponível em: <https://gisepeprd.epe.gov.br/webmapepe/>. Acesso em: maio 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/semiario.shtm?c=4>. Acesso em: maio 2019.

IEA – International Energy Agency. **CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2018**. 2018. Paris, França.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/>. Acesso em: jul. 2019.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2017. São José dos Campos, Brasil.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Global energy transformation: A roadmap to 2050**. 2019. Abu Dhabi.

MARTINS, F. R., ABREU, S. L., PEREIRA, E. B. **Scenarios for solar thermal energy applications in Brazil**. Energy Policy, Guildford. 2012. São Paulo, Brasil.

MDA – Ministério da Agricultura, Agropecuária e Abastecimento. Disponível em: <http://www.mda.gov.br/sitemda/noticias/caatinga-regi%C3%A3o-mais-ruralizada-do-brasil>. Acesso em: maio 2019.

MME/EPE – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. **Energia Termelétrica**. 2016. Rio de Janeiro, Brasil.

MME/EPE – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. **Mudanças Climáticas e Desdobramentos sobre os Estudos de Planejamento Energético**. 2018. Rio de Janeiro, Brasil.

MME/EPE – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**. 2018. Brasília, Brasil.

MOHAMMED, A.; AURYBI, S. I.; GILANI HUSSAIN, H.; AL-KAYIEM, ALI A. ISMAEEL. **Mathematical evaluation of solar chimney power plant collector, integrated with external heat source for non-interrupted power generation**. 2018. Perak, Malaysia.

NREL – The National Renewable Energy Laboratory. **Solar Resource Glosary**. Disponível em: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/solar-glossary.html>. Acesso em: jun. 2019.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Plano da Operação Elétrica 2017/2018**. 2016. Brasília, Brasil.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Plano da Operação Energética 2016/2020**. 2016. Brasília, Brasil.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível em: www.ons.gov.br. 2019. Acesso em: 5 jul. 2019.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC): COP-21**. 2015. Paris, França.

PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia 2024. 2015. MME/EPE – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, Brasil.

PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia 2027. 2018. MME/EPE – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, Brasil.

PENGHUA GUO; TIAN TIAN LI; BEN XU; XINHAI XU; JINGYIN LI. **Questions and current understanding about solar chimney power plant: A review.** 2018. China.

PNE – Plano Nacional de Energia 2030. 2007. MME/EPE – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, Brasil.

SCHLAICH, J.; BERGERMANN, R.; SCHIEL, W.; WEINREBE, G. **Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems. Schlaich Bergermann und Partner.** 2011. Stuttgart, Alemanha.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. **Emissões dos setores de energia, processos industriais e uso de produtos.** 2018. Brasil.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. 2019. Brasil.

SHC/IEA – Solar Heating & Cooling Programme. **International Energy Agency.** Solar Heat Worldwide. 2018. Gleisdorf, Austria.

TEIXEIRA, M. N. O sertão semiárido. Uma relação de sociedade e natureza numa dinâmica de organização social do espaço. **Revista Sociedade e Estado.** 2015.

The World Bank – International Bank for Reconstruction and Development. **Tracking SGD7: The Energy Progress Report.** 2019. Washington, EUA.

WEC – World Energy Council. **World Energy: Issues Monitor 2018.** 2018. Londres, Reino Unido.

