**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA AMBIENTAL**

BRUNA CRASNOJAN CHICANO

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR UMA TORRE SOLAR:
SUSTENTABILIDADE, BENEFÍCIOS PARA O MEIO AMBIENTE E
DESENVOLVIMENTO SOCIAL**

**SÃO PAULO
2019**

BRUNA CRASNOJAN CHICANO

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR UMA TORRE SOLAR:
SUSTENTABILIDADE, BENEFÍCIOS PARA O MEIO AMBIENTE E
DESENVOLVIMENTO SOCIAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestra em Ciência Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Joseph Harari
Coorientador: Prof. Dr. João D. T. Arruda Neto

Versão Corrigida
(Versão original encontra-se na unidade que aloja o Programa de Pós-Graduação)

SÃO PAULO
2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Chicano, Bruna Crasnojan.

Geração de energia elétrica por uma torre solar: sustentabilidade, benefícios para o meio ambiente e desenvolvimento social / Bruna Crasnojan Chicano; orientador: Joseph Harari ; Co-orientador : João D. T. Arruda Neto . – São Paulo, 2019.

80 f.: il. 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Fontes de energia renováveis. 2. Geração de energia elétrica. 3. Sustentabilidade. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

Nome: CHICANO, Bruna Crasnojan

Título: Geração de energia elétrica por uma torre solar: sustentabilidade, benefícios para o meio ambiente e desenvolvimento social

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestra em Ciência Ambiental.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Dedico este trabalho aos meus pais,
pelo amor incondicional e o incentivo de uma vida inteira.

À vida e à luz que a cerca,
agradeço pelo tempo e pela oportunidade de errar, aprender e evoluir.

À minha família, agradeço por serem meu porto seguro.

Aos meus amigos, agradeço todo o apoio e a energia positiva.

Aos professores que contribuíram, com seus ensinamentos e orientações, para que eu
concluísse mais essa etapa: meu eterno obrigada.

“Olhe profundamente a natureza, e então você entenderá tudo melhor.”

Albert Einstein

RESUMO

CHICANO, Bruna Crasnojan. **Geração de energia elétrica por uma torre solar: sustentabilidade, benefícios para o meio ambiente e desenvolvimento social.** 2019. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

A necessidade cada vez maior por energia tem levado a uma busca desenfreada por novas maneiras de geração. No Brasil até há pouco essa busca parecia estar sob controle, principalmente devido à diversidade de sua matriz energética, preponderantemente constituída por energia de hidroelétricas e termelétricas.

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 flora locais.

Petróleo, carvão e gás natural são combustíveis triplamente inconvenientes, ou seja, são não renováveis, altamente poluentes (o gás natural em menor grau) e muito mais caros. 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 o de 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.

O objetivo desse trabalho foi estudar e avaliar a análise da inserção de uma nova maneira de geração de energia sustentável, no sistema energético, que além de não agredir o meio ambiente também enormemente impulsiona o desenvolvimento social regional – trata-se do estudo sobre a Torre Solar (usina termosolar) no escopo do desenvolvimento limpo do Brasil.

Palavras-chave: torre solar, sustentabilidade, efeito estufa, energia renovável, energia verde

ABSTRACT

CHICANO, Bruna Crasnojan. **Generation of power energy by a solar tower: sustainability, benefits for the environment and social development.** 2019. 80 f. Dissertation (Master in Environmental Science) - Graduate Program in Environmental Science - Institute of Energy and Environment, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

The growing need for energy has led to an unbridled search for new ways of generation. In Brazil until recently this search seemed to be under control, mainly due to the diversity of its energy matrix, predominantly constituted by hydroelectric and thermoelectric power.

Although it presents a very low index of emissions of greenhouse gases, hydroelectric plants have a great social and environmental impact in the regions where they are built. Large areas are flooded, causing irreversible damage to local flora and fauna.

Oil, coal and natural gas are threefold disadvantageous fuels, that is, they are non-renewable, highly polluting (natural gas to a lesser degree) and much more expensive. In addition to the emission of harmful gases and causing the greenhouse effect, environmental degradation already begins with its collection, in the withdrawal of this material from nature.

All these circumstances point to the fact that more important than finding new solutions to the energy problem, is to find sustainable and long-term solutions that do not harm the environment and its ecosystems and that still bring the possibility of advancement and improvement for the society.

The objective of this work was to study and evaluate the analysis of the insertion of a new way of generating sustainable energy in the energy system, which not only does not harm the environment, but also greatly boosts regional social development – this is the study of a Solar Tower (thermosolar power plant) within the scope of the clean development of Brazil.

Keywords: solar tower, sustainability, greenhouse effect, renewable energy, green energy

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Linhas de transmissão existentes no SIN	28
Figura 2: Linhas de transmissão planejadas no SIN	29
Figura 3: Ciclo causa-consequência da crise hídrica	33
Figura 4: Protótipo da torre solar, em Manzanares, Espanha	42
Figura 5: Princípio de funcionamento da Torre Solar	45
Figura 6: Topografia no território brasileiro	49
Figura 7: Clima no território brasileiro	50
Figura 8: Precipitação anual no território brasileiro	51
Figura 9: Temperatura média no território brasileiro em 2018	52
Figura 10: Temperatura média no território brasileiro em 2008	52
Figura 11: Média anual da irradiação global horizontal	55
Figura 12: Médias mensais da irradiação global horizontal	56
Figura 13: Média anual da irradiação direta normal	57
Figura 14: Médias mensais da irradiação direta normal	58
Figura 15: Média anual da irradiação no plano inclinado da latitude	59
Figura 16: Médias mensais da irradiação no plano inclinado da latitude	60
Figura 17: Média anual da irradiação direta normal	61
Figura 18: Região em conjunto com áreas inundadas e rios principais	63
Figura 19: Região em conjunto com linhas de transmissão existentes	63
Figura 20: Regiões com média global de radiação solar maior que 5 kWh/m ²	64
Figura 21: Regiões apropriadas para a aplicação do projeto	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil	18
Gráfico 2: Participação setorial no consumo de eletricidade no Brasil	19
Gráfico 3: Participação das fontes na capacidade instalada	19
Gráfico 4: Dependência externa do Brasil em relação a eletricidade	20
Gráfico 5: Relação entre produção e consumo de eletricidade	21
Gráfico 6: Produção de eletricidade em 2008 e 2017	22
Gráfico 7: Evolução do consumo de gás natural	23
Gráfico 8: Consumo de carvão vapor para geração termelétrica	24
Gráfico 9: Consumo de derivados de petróleo para geração elétrica	24
Gráfico 10: Projeção do consumo de eletricidade, no panorama 2005/2030, em TWh	25
Gráfico 11: Projeção do consumo por subsistema, no panorama 2005/2030, em TWh	26
Gráfico 12: Projeção da carga por subsistema, no panorama 2005/2030, em MWmédio .	27
Gráfico 13: Capacidade instalada de UTEs a gás natural no Brasil	31
Gráfico 14: Centrais termelétricas a carvão mineral em operação	31
Gráfico 15: Emissões de CO ₂ na produção de energia elétrica	38
Gráfico 16: Emissão de CO ₂ associado à geração de energia elétrica	39

LISTA DE SIGLAS

W - Watt

MW – Megawatt

GW – Gigawatt

kWh – Quilowatt hora

GWh – Gigawatt hora

MWh – Megawatt hora

TWh – Terawatt hora

kV – Quilovolt

tep – Toneladas equivalentes de petróleo

Mtep – Milhões de toneladas equivalentes de petróleo

K – graus Kelvin

CO₂ – Dióxido de carbono

GEE – Gases de efeito estufa

GNL – Gás natural liquefeito

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

MMGD – Micro e mini geração distribuída

UHE – Usina hidrelétrica

SIN – Sistema Interligado Nacional

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

MME – Ministério de Minas e Energia

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

UNFCCC – Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

COP 21 – 21ª Conferência das Partes

PNMC – Política Nacional sobre Mudança do Clima

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	16
3. JUSTIFICATIVA	17
4. SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO	18
4.1 Análise do setor energético nacional	18
4.2 Geração de eletricidade no Brasil	21
4.3 Consumo de combustíveis fósseis para geração de eletricidade	22
4.4 Planejamento no Brasil	25
4.4.1 Plano Nacional de Energia 2030	25
4.4.2 Sistema Interligado Nacional	27
4.4.3 Termelétricas como plano B	30
4.5 Impactos sociais e sustentabilidade	32
4.6 Potencial renovável	35
5. SETOR ENERGÉTICO MUNDIAL	37
5.1 Geração de energia e o aquecimento global	37
5.2 Política energética no Brasil e no mundo	39
6. TORRE SOLAR COMO ALTERNATIVA	42
6.1 Histórico	42
6.2 Conceito	43
6.3 Princípio de funcionamento	43
7. A TORRE SOLAR NO BRASIL	47
7.1 Análise geográfica do Brasil	48
7.1.1 Energia solar	53
7.1.2 Irradiação solar no Brasil	54
7.2 O projeto	62
7.2.1 Localização	62
7.2.2 Parâmetros de construção	66
7.3 Avaliação socioambiental e desenvolvimento sustentável	70
7.4 A torre solar no mundo	72
8. CONCLUSÃO	73
9. BIBLIOGRAFIA	77

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica é um dos processos essenciais que garantem não apenas a continuidade, mas principalmente a qualidade de vida no planeta Terra. Não é necessário que se vá muito longe para argumentar a favor dessa afirmação, basta imaginar como teria sido o desenvolvimento humano se o fenômeno da eletricidade nunca houvesse sido descoberto.

E ainda, como seriam os dias atuais se não pudéssemos usufruir dos benefícios por ela oferecidos. Fato esse que se pode não apenas imaginar, mas constatar. Segundo dados do Relatório de Progresso Energético - Tracking SGD7: The Energy Progress Report – do Banco Mundial (World Bank), cerca de 1 bilhão de pessoas - aproximadamente 13% da população mundial - vive sem eletricidade. O número de pessoas com acesso à energia elétrica vem aumentando desde 2010, cerca de 118 milhões por ano, mas o progresso tem sido desigual. A meta de acesso universal à eletricidade deve ser cumprida até 2030. Caso contrário, se as políticas e tendências populacionais continuarem, até 674 milhões de pessoas poderão continuar a viver sem eletricidade em 2030 (World Bank, 2018).

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 dos mesmos? 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 visam e garantem a geração de energia sustentável?

Inicialmente, tanto no Brasil, quanto em inúmeros países ao redor do mundo, o conceito de sustentabilidade está inserido em algumas vertentes do desenvolvimento. O termo sustentabilidade demanda de consciência e responsabilidade, ou seja, num sistema sustentável há um compromisso com o futuro, mais especificamente com a condição em que deixaremos o planeta para que as gerações futuras possam usufruir e ter qualidade de vida, além de garantir essa continuidade.

O primeiro passo, quando se trata de futuro, é a elaboração de um planejamento, o que permite que haja uma avaliação minuciosa do que existe no presente e, consideradas todas as condições, do que pode vir a existir no futuro.

A geração de energia elétrica é um dos fatores que causam mais preocupações quanto ao futuro. Primeiro porque, como já foi mencionado, a eletricidade é um bem fundamental para

o desenvolvimento humano. O segundo motivo pode ser destacado pela própria natureza: todas as fontes de energia utilizam recursos naturais.

Fato é que o modelo de vida como conhecemos é totalmente dependente de combustíveis fósseis como fonte de energia útil, e ainda que haja alternativas para sua substituição, essa transição não deve ocorrer de forma imediata.

Um dos maiores desafios do nosso tempo é duplo: a necessidade de atender a crescente demanda por energia enquanto, ao mesmo tempo, reduzimos as emissões de carbono (BP ENERGY, 2019).

A geração de energia elétrica de origem renovável pode começar a reduzir emissões de dióxido de carbono de forma imediata e substancial. Essa combinação também está ficando mais barata do que as alternativas baseadas em combustíveis fósseis, reduz a poluição do ar local, é benéfico à saúde, resulta em benefícios socioeconômicos positivos e será um elemento essencial para construir economia e sociedade conectadas e digitalizadas. Eletrificação, quando combinada com energias renováveis, anda de mãos dadas com a eficiência energética, resultando em menor demanda global de energia (IRENA, 2019).

No que diz respeito à geração de energia elétrica, existem alternativas bem consolidadas em andamento e, ainda, inúmeras pesquisas por novas tecnologias em desenvolvimento.

No caso do Brasil, como será analisado a seguir, a responsável pela geração de mais da metade da energia elétrica da qual usufruímos é a água. O Brasil - e suas dimensões continentais - é contemplado com condições geográficas que favorecem grandemente o uso de recursos hídricos como fonte geradora de energia. No entanto, mesmo essa abundância não é suficiente para a demanda atual por energia elétrica.

Atualmente, a principal fonte alternativa para as crises hídricas, enfrentadas com recorrência, são as usinas térmicas. Em sua maioria, as usinas térmicas também causam inconvenientes, tais como o aumento da tarifa paga pelo consumidor, além da emissão de gases causadores do aquecimento global, entre outras incongruências que serão discutidas posteriormente.

O Brasil se encontra com uma crescente demanda energética e ausência de alternativas sustentáveis efetivas. Os recursos naturais utilizados atualmente são fontes esgotáveis de energia, com exceção da água. Porém, as hidroelétricas enfrentam grandes problemas em períodos de estiagem, de maneira que a Torre Solar utiliza uma fonte inesgotável de energia e sua utilização não representa exploração e consequente impacto negativo ao meio ambiente e à sociedade.

O impacto ambiental de uma Torre Solar é mínimo, seja ele em termos de paisagem, fauna ou flora. Sua construção se dá, principalmente, em regiões menos habitadas e castigadas pela seca, que apresentam terras praticamente sem utilidade para plantio e que sofrem pela falta de infraestrutura, não impondo o deslocamento da população local.

A Torre Solar não emite gases nocivos, não expele qualquer tipo de substância no solo e sua única fonte de energia é inesgotável. Além disso, pode se tornar uma alternativa ao uso de usinas termelétricas.

O benefício socioeconômico de uma Torre Solar é considerável, especialmente para camadas sociais mais baixas, que passam a ter acesso à energia a um custo aceitável. Além disso, sua construção gera empregos imediatos e oportunidades a longo prazo, o que leva ao desenvolvimento social regional, elevando o padrão de vida da população.

2. OBJETIVOS

Os objetivos desse trabalho envolvem estudar a viabilidade da Torre Solar como uma alternativa, 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.

Podem ser subdivididos em:

- Mapeamento de áreas de aplicação no Brasil;
- Esboço dos parâmetros básicos de funcionamento da Torre Solar, para aplicação no Brasil, a partir de cálculos matemáticos fornecidos pelo desenvolvedor do projeto original;
- Demonstração da redução de GEE com a aplicação da Torre Solar, em substituição das Usinas Termelétricas (principal plano de contingência nacional para crises hídricas);
- Análise e discussão sobre a mitigação dos impactos ambientais e sociais trazidos pela alternância da tecnologia, relacionando as benfeitorias agregadas.

3. JUSTIFICATIVA

Uma vez que o Brasil tem um grande potencial solar a ser explorado, novas alternativas de geração de energia sustentável e renovável podem ser usufruídas. Com base nos princípios físicos de funcionamento da Torre Solar, pode-se desenvolver um novo modelo de usina termosolar, utilizando-a como um novo meio de geração de energia limpa para o território nacional, além da possibilidade de desenvolvimento social na região de sua construção, uma vez que energia está intimamente associada à nucleação de parques industriais, projetos agricultores, entre outros.

Além disso, como será discutido a seguir, o plano alternativo para a questão de escassez da água nas bacias hidrelétricas é a usina termelétrica. Além desse ser um problema enfrentado com recorrência, as termelétricas causam grandes inconvenientes, tanto financeiramente quanto para a saúde da população, emitindo gases nocivos, causadores do aquecimento global.

Em suma, uma usina termosolar contempla o tripé “sustentabilidade, preservação do meio ambiente, desenvolvimento social”.

Uma das questões fundamentais para o desenvolvimento sustentável está na inovação e desenvolvimento de tecnologias de conversão e aproveitamento de recursos energéticos naturais. A necessidade de energia para o desenvolvimento de um país é inquestionável, porém a aplicação de tecnologias que buscam o incremento da eficiência energética e a sustentabilidade da produção asseguram e possibilitam um desenvolvimento com impactos ambientais reduzidos (INPE, 2017).

A seguir, será realizada uma análise do setor energético brasileiro. O planejamento energético envolve diversos fatores que contribuem para a tomada de decisão do setor. Vale ressaltar que, além de ter-se um planejamento bem elaborado, também se faz necessário investir em pesquisas e novas alternativas de geração de energia, para a substituição de tecnologias que podem ser consideradas obsoletas à medida que não correspondem às premissas da sustentabilidade.

4. SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO

4.1 Análise do setor energético nacional

A análise do setor energético brasileiro se faz necessária para compreendermos o cenário atual no campo da energia e suas necessidades futuras para a geração de energia elétrica no país.

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. 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 mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (BEN, 2018).

Gráfico 1: Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil – EPE, 2018.

Através dos dados gráficos, é possível notar que as energias solar e eólica somadas, correspondem a aproximadamente 7% da oferta interna de energia elétrica no Brasil, enquanto a energia gerada por biomassa, que contempla lenha, bagaço de cana, lixívia entre outros, corresponde a uma parcela de 8,2%.

Já a oferta interna de energia por combustíveis fósseis, somam um montante de 19,6%.

Em relação ao consumo, no gráfico 2 nota-se que os setores industrial, residencial e comercial – somados – respondem por mais de 80% da energia elétrica consumida no país.

Gráfico 2: Participação setorial no consumo de eletricidade no Brasil – EPE, 2018.

O gráfico 3 ilustra a participação das fontes na capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil.

Gráfico 3: Participação das fontes na capacidade instalada – EPE, 2018.

Em 2017, a capacidade total instalada de geração de energia elétrica do Brasil (centrais de serviço público e autoprodutoras) alcançou 157.112 MW, acréscimo de 6.775 MW em relação ao ano de 2016 (BEN, 2018).

Em relação as fontes renováveis – com exceção da fonte hídrica – somam-se 17,6%, o que equivale a cerca de 27.651,7 MW de capacidade instalada.

Na expansão da capacidade instalada, as centrais hidráulicas contribuíram com 3350 MW ou seja 49,5% do total adicionado, enquanto as eólicas responderam por outros 2159 MW, equivalente à 21,3% da capacidade adicionada. Destaque para a evolução da potência instalada de solar fotovoltaico que atingiu com 935 MW em 2017, contra 24 MW no ano anterior (BEN, 2018).

O gráfico 4 ilustra a dependência externa do Brasil em relação a eletricidade. É a diferença entre a demanda interna de energia (inclusive perdas de transformação, distribuição e armazenagem) e a produção interna, mostrando sua evolução num período de dez anos, entre 2008 e 2017 (BEN, 2018).

Gráfico 4: Dependência externa do Brasil em relação a eletricidade, em milhares de tep – adaptado EPE, 2018.

No ano de 2008, a dependência externa de energia foi de 42.211.000 toneladas equivalentes de petróleo (tep). Em 2017 essa dependência apresentou um declínio e foi de 36.355.000 toneladas equivalentes de petróleo (BEN, 2018).

Ao longo dos dez anos analisados, entre as variações apresentadas, a média calculada para a dependência externa de energia elétrica, em toneladas equivalentes de petróleo foi de 37.734.600 de toneladas equivalentes de petróleo, que equivale a 6,58% da matriz elétrica.

4.2 Geração de eletricidade no Brasil

O gráfico 5 mostra a relação entre produção e consumo final, em gigawatt hora (GWh) de eletricidade no Brasil, ao longo de 10 anos.

Gráfico 5: Relação entre produção e consumo de eletricidade, em GWh – adaptado EPE, 2018.

No período abordado no gráfico 5, é possível notar o crescente aumento na demanda por eletricidade e sua consequente expansão de produção. Houve um aumento de 97.986 GWh no consumo de eletricidade no país, assim como na produção, que acompanhou a demanda e cresceu 124.842 GWh.

O aumento da demanda – e suas consequências na geração de eletricidade – segue o ritmo do padrão mundial. Segundo dados do relatório Statistical Review of World Energy 2019, que analisa os níveis de produção e consumo de energia mundiais, realizado pela BP Energy, no período observado de 2007 a 2017, houve um aumento de 2,5% na geração de energia elétrica, a nível mundial. Apenas no último ano, em 2018, o aumento foi de 3,7%. Em 2018 foram gerados cerca de 26.614,8 terawatt hora (TWh) de eletricidade no mundo todo.

Segundo dados desse mesmo relatório, a taxa de crescimento de geração elétrica no Brasil, entre 2007 e 2017, foi de 2,8%.

Gráfico 6: Produção de eletricidade em 2008 e 2017, em GWh – adaptado EPE, 2018.

O gráfico 6 descreve o fluxo de produção de energia – em gigawatt hora (GWh) – utilizando os anos de 2008 e 2017 comparativamente, relacionando a origem de geração entre centrais elétricas de serviço público, centrais autoprodutoras e a eletricidade provinda de importação. Além disso, é possível contabilizar e subtrair do consumo, a eletricidade que é exportada e ainda, suas perdas.

4.3 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).

Gráfico 7: Evolução do consumo de gás natural – adaptado EPE, 2018.

Observa-se no primeiro quinquênio – de 2017 a 2022 – uma redução no consumo de gás natural, associado à geração elétrica esperada, devido à expectativa de alívio na severidade das condições hidrológicas observadas em 2018 e à entrada em plena operação dos grandes empreendimentos hidrelétricos construídos nos últimos anos. Entretanto, no segundo quinquênio – de 2022 a 2027 –, estima-se um acréscimo no consumo, associado a um maior crescimento econômico, que repõe e supera a queda observada anteriormente (PDE 2027, 2018).

Em relação ao carvão, na geração elétrica o carvão utilizado é o carvão vapor, predominantemente de origem nacional, cujos estados produtores são Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A demanda de carvão vapor para este uso final diminuiu 4,2% em 2017 em relação ao ano anterior (BEN, 2018).

O consumo de carvão vapor no Brasil se dá por dois principais seguimentos: termelétrica e industrial. Ao longo de dez anos, como mostra no gráfico anterior, a média do consumo total da fonte primária foi de 6.409.800 toneladas equivalentes de petróleo (tep). Do ano de 2008 para 2017, o consumo total aumentou consideravelmente, foi de 4.914.000 para 7.305.000 toneladas equivalentes de petróleo e, desse último mais da metade – 52,2% – foi destinado ao uso nas termelétricas, para a geração de energia elétrica, através de sua queima.

O gráfico 8 mostra a evolução do uso do carvão vapor nas usinas termelétricas, ao longo de 10 anos.

Gráfico 8: Consumo de carvão vapor para geração termelétrica, em milhares de tep – adaptado EPE, 2018.

No Brasil, existe ainda o consumo de lenha, para a 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 termelétrica.

Em relação ao consumo de derivados de petróleo, a produção nacional de petróleo cresceu 4% em 2017, atingindo a média de 2,62 milhões de barris diários, dos quais 95,0% são de origem marítima (BEN, 2018).

Gráfico 9: Consumo de derivados de petróleo para geração elétrica – adaptado EPE, 2018.

O gráfico 9 mostra a evolução do consumo de derivados de petróleo para a geração de energia elétrica, ao longo dos anos.

De 2008 para 2017, o consumo de petróleo aumentou de 96.589.000 para cerca de 113.522.000 toneladas equivalentes de petróleo (tep). Do total, o maior consumidor de derivados de petróleo foi o setor de transportes, responsável por cerca de 56% do consumo. Já o consumo, aplicado a geração de energia elétrica, manteve uma média de cerca de 4%, distribuídos entre as centrais elétricas de serviço público e centrais elétricas autoprodutoras.

4.4 Planejamento no Brasil

4.4.1 Plano Nacional de Energia 2030

A última versão do Plano Nacional de Energia – PNE – foi lançada no ano de 2007, e faz um prognóstico para o ano de 2030. O PNE considera aspectos econômicos e demográficos em seu planejamento.

A elaboração do PNE 2030 se apoiou em uma série de estudos que envolveram análise das perspectivas da economia mundial e brasileira no longo prazo e suas consequências para o sistema energético nacional, da disponibilidade, das perspectivas de uso e da competitividade dos recursos energéticos, da segurança do suprimento, dos aspectos socioambientais inerentes à expansão da oferta, da capacitação industrial, do desenvolvimento tecnológico e da eficiência energética (PNE, 2007).

Gráfico 10: Projeção do consumo de eletricidade, no panorama 2005/2030, em TWh. – Fonte: EPE, 2007.

O gráfico 10 demonstra a projeção do consumo de eletricidade, dos anos de 2005, 2010, 2020 e 2030. No relatório, a curva apresentada pelo gráfico anterior é separada por setores, entre eles: residencial, industrial, comercial e público, rural, iluminação pública e ainda, setor energético. Também é considerado no cálculo a autoprodução.

O destaque é dado, principalmente, pelo consumo residencial, que é o setor que apresenta maior aumento. No entanto, o fato está relacionado diretamente a fatores econômicos.

Deve-se ressaltar que os valores projetados do consumo médio residencial ainda são muito baixos, quando confrontados com padrões internacionais, e que a sua evolução está diretamente ligada, entre outros fatores, à estabilização da economia. Além disso, a perspectiva de crescimento econômico pode trazer reflexos positivos na distribuição de renda, o que também funciona como elemento impulsionador do consumo residencial (PNE, 2007).

O gráfico 11 mostra a projeção de consumo de eletricidade por macrorregião, nos anos 2005, 2010, 2020 e 2030.

Gráfico 11: Projeção do consumo por subsistema, no panorama 2005/2030, em TWh. – Fonte: EPE, 2007.

A partir dessa projeção e admitindo-se um cenário para evolução do que se convencionou chamar de perdas totais (técnicas e comerciais), obtém-se a projeção da carga de energia. A carga de energia é o requisito a ser atendido pelo sistema elétrico – geração, transmissão e distribuição. É, por assim dizer, uma medida composta pelo lado da oferta, na medida em corresponde à energia total a ser produzida nas usinas geradoras a fim de atender à demanda

dos consumidores finais, consideradas não só todas as perdas elétricas ocorridas ao longo da rede de transmissão/distribuição, mas também todas as diferenças no faturamento (PNE, 2007).

O gráfico 12 demonstra a projeção da carga de energia por macrorregião, nos anos 2005, 2010, 2020 e 2030.

Gráfico 12: Projeção da carga por subsistema, no panorama 2005/2030, em MWmédio. – Fonte: EPE, 2007.

O relatório da EPE (2007) apresenta ainda alternativas para o atendimento da demanda por eletricidade. No que diz respeito à expansão da oferta, o principal elemento considerado é a expansão das usinas termelétricas, e não apenas a partir de fontes renováveis, como a biomassa, por exemplo. O PNE prevê também a expansão de usinas termelétricas movidas a combustíveis fósseis, tais como gás natural e carvão, além das usinas nucleares.

Além disso, centrais hidrelétricas e eólicas são consideradas, inclusive autoprodução.

4.4.2 Sistema Interligado Nacional

A produção de energia elétrica e sua consequente transmissão é formada por um sistema constituído por usinas hidrelétricas, térmicas e eólicas.

As usinas geradoras de energia elétrica no Brasil, em conjunto, formam o Sistema Interligado Nacional (SIN).

A capacidade instalada de geração do SIN é composta, principalmente, por usinas hidrelétricas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país. Nos

últimos anos, a instalação de usinas eólicas, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, apresentou um forte crescimento, aumentando a importância dessa geração para o atendimento do mercado. As usinas térmicas, em geral localizadas nas proximidades dos principais centros de carga, desempenham papel estratégico relevante, pois contribuem para a segurança do SIN. Essas usinas são despachadas em função das condições hidrológicas vigentes, permitindo a gestão dos estoques de água armazenada nos reservatórios das usinas hidrelétricas, para assegurar o atendimento futuro. Os sistemas de transmissão integram as diferentes fontes de produção de energia e possibilitam o suprimento do mercado consumidor (ONS, 2019).

O mapa a seguir (Figura 1), fornecido pelo Sistema de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro, mostra as linhas de transmissão existentes no SIN.

Figura 1: Linhas de transmissão existentes no SIN – Fonte: EPE, 2019.

Além do atendimento ao mercado, o sistema de transmissão desempenha o importante papel de interligar os submercados de energia elétrica, permitindo a equalização dos preços da

energia por meio da minimização dos estrangulamentos entre os submercados, possibilitando um despacho otimizado do parque gerador (PDE 2027, 2018).

A Rede Básica de transmissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), que compreende as tensões de 230 kV a 800 kV, tem como principais funções: (i) a transmissão da energia gerada pelas usinas para os grandes centros de carga; (ii) a integração entre os diversos elementos do sistema elétrico para garantir estabilidade e confiabilidade da rede; (iii) a interligação entre as bacias hidrográficas e regiões com características hidrológicas heterogêneas de modo a otimizar a geração hidrelétrica; e (iv) a integração energética com os países vizinhos (PDE 2027, 2018).

O mapa da Figura 2 mostra as linhas de transmissão em fase de planejamento, no SIN.

Figura 2: Linhas de transmissão planejadas no SIN – Fonte: EPE, 2019.

4.4.3 Termelétricas como Plano B

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 através do manejo do armazenamento dos reservatórios das usinas hidrelétricas.

Assim sendo, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), órgão governamental responsável por coordenar e supervisionar a operação centralizada do Sistema Integrado Nacional (SIN), leva em consideração uma estrutura de procedimentos que dão suporte à tomada de decisão.

O primeiro item a ser avaliado é a volatilidade interanual, que nada mais é do que o alto índice de variação relacionado à vazão média anual dos rios, ao longo dos anos (EPE, 2016). Isso quer dizer que não há um padrão de variação, há na realidade um alto índice de dispersão na média considerada, o que torna difícil prever o comportamento da vazão dos rios nos anos subsequentes.

O segundo item é chamado de sazonalidade intra anual, que é a variação de vazão, graças a sazonalidade, alternando entre os períodos secos e úmidos do ano vigente.

O terceiro item é a complementaridade e diversidade regional, que diz respeito às diferenças climáticas entre as regiões brasileiras. Uma vez que o Brasil tem dimensões continentais, numa mesma época do ano é possível haver climas, temperaturas e comportamentos climáticos completamente opostos. Enquanto em uma região pode haver escassez hídrica, em outra pode ocorrer o oposto. Graças à localização distinta das bacias hidrográficas, é praticável a complementaridade do sistema, onde uma região que esteja abastada com recursos hídricos pode abastecer outra região, que esteja passando por um período de insuficiência.

O quarto e último item é o acoplamento espacial e temporal das decisões. É a avaliação das vantagens proporcionadas pela preservação da condição de armazenamento nos reservatórios, ou seja, quando é um melhor negócio manter a água armazenada do que usá-la.

Segundo dados da EPE, de 2016, o Brasil obteve cerca de 12388MW 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 3,2GW (EPE, 2016).

O gráfico 13 mostra a capacidade instalada de usinas termelétricas a gás natural, em megawatt (MW), subdivididas em macrorregiões, segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética.

Gráfico 13: Capacidade instalada de UTEs a gás natural no Brasil, em MW – Fonte: EPE, 2016.

Complementando os dados do gráfico 13, esses valores são relativos a 86 usinas na região sudeste e centro-oeste, 36 usinas na região nordeste, 13 usinas na região sul e, finalmente, 10 usinas na região norte, somando um total de 145 usinas termelétricas a gás natural no país.

O gráfico 14 mostra a predominância regional das usinas termelétricas a carvão mineral em operação no Brasil, atualmente.

Gráfico 14: Centrais termelétricas a carvão mineral em operação, em MW – Fonte: EPE, 2016.

Pode-se notar que há uma proeminência deste tipo de geração na região sul do Brasil, que soma, ao todo, sete usinas.

A opção a gás natural se apresenta até o momento como a referência natural para a expansão de geração termelétrica. A curto e médio prazos, o GNL importado representa o combustível padrão para o desenvolvimento de novas usinas. Porém, o desenvolvimento das reservas do pré-sal, ainda com horizonte incerto, poderá ampliar significativamente a oferta de gás natural nacional e, consequentemente, a contribuição na matriz energética brasileira. Em relação ao carvão mineral nacional, o aproveitamento para novas plantas esbarra nas dificuldades ambientais e nas condições de financiamento, especialmente junto ao BNDES, que, por serem menos atrativas que aquelas aplicáveis a tecnologias a gás natural, colocam as termelétricas a carvão em condição menos competitivas (PDE 2027, 2018).

4.5 Impactos sociais e sustentabilidade

O principal plano real de contingência para que 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 da intermitência de operação desses empreendimentos (a geração depende da ocorrência de ventos), tiveram um crescimento de 4.000% da potência instalada total em apenas dez anos (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 hidrelétricas, 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, consequentemente, elevou a intensidade de carbono atrelada à geração de eletricidade (especialmente entre 2011 e 2014) (SEEG, 2018).

No entanto, com a ocorrência do aquecimento global, agravando as mudanças climáticas em todo o globo, como pode-se julgar confiáveis as previsões feitas pelo homem, ainda que realizadas através dos melhores métodos possíveis, se utilizando dos 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 no processo de forma cíclica:

Figura 3: Ciclo causa-consequência da crise hídrica.

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 ser destacado 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 dessas 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.

Alinham-se entre essas alternativas a queima conjunta de carvão e biomassa, a adição de biogás ao gás natural, a captura e estocagem de CO₂. Na área nuclear, avanços tecnológicos deverão contribuir para o tratamento e o manejo aceitável dos rejeitos radioativos. Na área de fontes renováveis, a contribuição da tecnologia se faz evidente no aumento da produtividade do uso da terra na produção da biomassa e na redução de custos da geração eólica (PNE, 2007).

No entanto, reforça-se ao final do mesmo parágrafo que: “A escolha das alternativas dependerá, contudo, da disponibilidade de recursos, dos preços das fontes energéticas, das definições regulatórias, das restrições institucionais e dos custos das tecnologias” (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.

No entanto, outros modos de financiamento certamente tendem a aumentar os custos de implantação, podendo reduzir a atratividade econômica desta opção de expansão. Com isso, para o Cenário de Referência assumiu-se a premissa de que o desenvolvimento de usinas a carvão para ampliar a capacidade instalada somente seria viável após o horizonte decenal, ou seja, após 2027 (PDE 2027, 2018).

Em relação a “dificuldade ambiental”, citada anteriormente, o relatório cita a possibilidade de novas usinas a carvão, que apresentem maior eficiência energética e um maior controle sobre a emissão de poluentes.

Entretanto, considera-se a possibilidade de que novas usinas possam vir a fazer parte da expansão do sistema, dentro do horizonte decenal, na hipótese de substituição das usinas existentes por usinas mais modernas e, portanto, mais eficientes energeticamente, com menor emissão de gases de efeito estufa - GEE - e maior controle da emissão de poluentes (PDE 2027, 2018).

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 potenciais hidráulico, eólico, de biomassa e solar, que 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 sendo, de todos os parâmetros considerados para a expansão do setor energético e elétrico, visando suprir o crescimento da demanda no país, o fator econômico demonstra ser o significativo.

4.6 Potencial Renovável

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia – MME – no horizonte de 2050, o Brasil apresenta um potencial de aproveitamento energético, a partir de fontes renováveis, de cerca de 7371 Mtep (milhões de tonelada equivalentes de petróleo).

As fontes renováveis consideradas pelo relatório incluem biomassa, hidráulica, eólica (onshore e offshore), solar fotovoltaica (onshore e offshore), heliotérmica e oceânica.

No entanto, o aproveitamento dos recursos depende de viabilidade técnica e econômica que envolve muitas variáveis e restrições, como atributos geológicos (no caso dos minerais), além de levar em consideração aspectos tecnológicos, legais, regulatórios, ambientais, sociais e governamentais. Caso não haja economicidade, o poder público pode ainda criar mecanismos de incentivo que promovam o uso racional e eficiente dos recursos disponíveis. Logo, a facilidade de aproveitamento dos recursos torna-se tão relevante quanto o seu potencial (PREH 2050, 2018).

A energia solar é uma das alternativas energéticas mais promissoras para os desafios deste milênio. A rigor, a energia proveniente do Sol não é renovável, mas uma fonte inesgotável levando em consideração a escala de tempo da vida no planeta Terra. O aquecimento solar, a geração de eletricidade, a climatização de ambientes, exemplificam os processos e tecnologias produzidos pelo desenvolvimento científico e tecnológico. Um avanço significativo foi conseguido nas últimas décadas tanto no aproveitamento térmico para atendimento de demandas residenciais ou processos industriais, quanto para conversão em eletricidade. O aproveitamento fotovoltaico, conhecido como geração fotovoltaica de eletricidade, também apresentou um intenso desenvolvimento que está resultando em um crescimento significativo da participação da energia solar na matriz energética mundial (INPE, 2017).

O aumento do poder de escolha – uma tendência geral na sociedade – tem se materializado no setor de eletricidade através da popularização das tecnologias de micro e mini geração distribuída (MMGD). O consumidor, podendo gerar sua própria energia, evolui de uma posição passiva para ativa no setor elétrico. Nos dois últimos anos, a MMGD cresceu expressivamente no Brasil, superando as projeções. De 2016 para 2017 houve um aumento de três vezes na

capacidade instalada acumulada, fechando o ano de 2017 com mais de 250 MW (PDE 2027, 2018).

Já a bioeletricidade, proveniente do bagaço de cana, é considerada como mais um ativo do setor renovável, que envolve a comercialização de quatro produtos: açúcar, etanol, eletricidade e, mesmo, créditos de carbono (ou certificados de reduções de emissões). Isso coloca a bioeletricidade com um grande potencial para a matriz energética nacional. Além do bagaço, destaque deve ser dado ao potencial do biogás. Este insumo energético é rico em metano, cujo poder calorífico é similar ao do gás natural. Assim, uma das possíveis rotas de sua utilização é em turbinas aeroderivativas ou em motores para geração elétrica. Diversos são os substratos que podem ser utilizados para produção de biogás, sendo os que têm maior potencial no cenário nacional os oriundos do setor agroindustrial (sobretudo sucroenergético), além dos resíduos animais e urbanos. A fração deste recurso utilizada atualmente corresponde a apenas uma parte de seu potencial (PDE 2027, 2018).

Em relação ao potencial eólico no Brasil, segundo dados do relatório Potencial de Recursos Energéticos no Horizonte 2050, a principal ênfase é dada na região nordeste. Quanto aos projetos offshore, o Brasil conta com 3 projetos em fase de análise pelo IBAMA. Os três parques, juntos, somam 435MW de capacidade instalada.

Destes 3 projetos, a planta piloto é o mais promissor, visto que se trata de projeto de pesquisa. Os outros projetos possuem pouca chance de serem instalados num curto prazo. Além da viabilidade econômica que seria necessária, não existe até o momento marco regulatório para a exploração do potencial eólico offshore no Brasil. Assim, questões como licenciamento ambiental, implementação ou modelo de concessão estão sem resposta e são fundamentais para o desenvolvimento desta fonte (PREH 2050, 2018).

Quanto a expansão da oferta de energia hidrelétrica, segundo o MME, cerca de 65% do potencial inventariado está na Amazônia, região que tem aproximadamente metade de sua extensão coberta por áreas protegidas (unidades de conservação, terras indígenas e terras ocupadas por remanescentes das comunidades dos quilombos). Essa sensibilidade socioambiental é refletida sobretudo nas políticas de proteção, nos conflitos sociais existentes e nas discussões acerca da implantação de UHEs.

5. SETOR ENERGÉTICO MUNDIAL

5.1 Geração de energia e o aquecimento global

Na média global, a geração de eletricidade é a atividade mais intensiva em emissão dentro do setor de energia. No Brasil, no entanto, esse cenário não se reproduz, devido ao enorme peso das fontes renováveis de energia em sua matriz elétrica, sobretudo a energia hidráulica. Contudo, já é possível perceber certa tendência de diminuição dessa hegemonia.

A participação das hidroelétricas na matriz elétrica brasileira torna o sistema elétrico brasileiro singular no que tange aos aspectos de impactos ambientais e emissões de gases de efeito estufa. No entanto, a hidroeletricidade, assim como todas as fontes renováveis de energia, está sujeita à influência de fatores climáticos de modo que a energia armazenada (representada pelo nível de água acumulada no reservatório) em períodos de seca pode atingir valores críticos sob o ponto de vista de segurança energética. Com esse recurso natural escasso, a oferta de energia diminui induzindo o crescimento do risco ao sistema energético e acarretando elevação dos preços da energia no país. Além disso, nos períodos de menor incidência de chuvas, o uso dessa água para geração de energia impacta criticamente no uso desse recurso para outros fins, tais como agricultura ou abastecimento (INPE, 2017).

Comparativamente, a intensidade de carbono emitida na geração de energia elétrica no Brasil é menor do que na Europa, Estados Unidos e China, por exemplo. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética – EPE – o Brasil emitiu, em 2018, cerca de 88 kg CO₂/MWh. Para produzir 1MWh, o setor elétrico brasileiro emite 2,9 vezes menos que o europeu, 3,7 vezes menos do que o setor elétrico americano e 5,8 vezes menos do que o chinês (BEN, 2019).

Como é apresentado no gráfico 15, as emissões de dióxido de carbono (CO₂) na produção de energia elétrica se sobressaem principalmente na China, que em 2016 foi responsável por cerca de 700,9 kg CO₂/MWh. Os dados são da *International Energy Agency* (IEA).

Gráfico 15: Emissões de CO₂ na produção de energia elétrica, em kgCO₂/MWh – Fonte: IEA, 2018.

Desde 1950, são observadas mudanças sem precedentes no período de décadas ou 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 atuais taxas, a temperatura do planeta poderá aumentar 5,4 °C até 2100 (Embrapa, 2018).

Segundo dados do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), as emissões de gases de efeito estufa, associadas à geração de eletricidade no SIN, podem ser verificadas a seguir, no período de 2008 a 2017.

O gráfico 16, fornecido 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. Não inclui emissões fugitivas.

Gráfico 16: Emissão de CO₂ associado 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 enorme desafio para a sustentabilidade da produção, dos ecossistemas terrestres e aquáticos e dos serviços à sociedade. 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).

A transformação global de energia é mais do que uma simples transformação no setor energético, é uma transformação de nossa sociedade e economia. A transformação da energia é multifacetada, e evolui em termos de tecnologias, socioeconômicos, impulsos institucionais e formas de financiamento (IRENA, 2019).

5.2 Política energética no Brasil e no mundo

As mudanças climáticas associadas às emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEE) constituem-se em uma das principais questões a serem enfrentadas na atualidade.

Adicionalmente, estudos preditivos do clima tendem a concordar com um aumento na frequência de eventos extremos, o que também poderia impactar a infraestrutura energética existente e planejada (EPE, 2018).

Observa-se que os grandes empreendimentos hidroelétricos na região Amazônica, como as usinas de Santo Antônio e Jirau no Rio Madeira e Belo Monte no Rio Xingu, são a principal ação de governo para ampliação do parque gerador com aproveitamento de recursos renováveis. No entanto, estes projetos enfrentam crescentes críticas de parte da sociedade em razão dos impactos sociais e ambientais causados pelas grandes áreas alagadas que implicam em remoção de populações ribeirinhas e indígenas, emissões de metano, alteração do ciclo hidrológico e danos ao equilíbrio ecossistêmico local. Além disso, os investimentos em grandes hidroelétricas intensificam a vulnerabilidade da matriz elétrica brasileira ao regime de chuvas, com forte influência na segurança energética do país. A capacidade de geração de energia elétrica por meio das hidroelétricas vem caindo a cada ano – aproximadamente 20 pontos percentuais em relação ao total gerado, nos últimos 10 anos – acarretando um aumento do risco de apagões e do custo da energia devido ao despacho adicional de usinas termelétricas (Tiepolo et al., 2016).

Esta é uma conjuntura extremamente desfavorável tendo em vista a incerteza associada aos cenários atuais de mudanças no clima e suas possíveis influências na frequência de eventos extremos, devendo ser de alguma forma mitigada (INPE, 2017).

No ano de 2015 foi realizada a 21ª Conferência das Partes em Paris, na França – a COP 21 – promovida pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). A COP 21 teve como objetivo fundamental definir um novo acordo internacional sobre o clima, tendo como sua meta essencial manter o aquecimento global abaixo dos 2°C, combatendo os efeitos das mudanças climáticas, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Segundo o secretário-geral da ONU, Ban Kimmon: “Pela primeira vez, cada país do mundo se compromete a reduzir as emissões, fortalecer a resiliência e se unir em uma causa comum para combater a mudança do clima. O que já foi impensável se tornou um caminho sem volta” (ONU, 2015).

O Brasil, em relação a COP 21, se comprometeu com metas integrais de redução de emissões, que implicam em uma diminuição de 37% das emissões de gases de efeito estufa até o ano de 2025, em relação a 2005.

O Brasil se destaca por possuir uma matriz energética com grande participação de fontes

renováveis, realidade verificada em poucos países do mundo. Segundo o Balanço Energético Nacional de 2018, a participação das renováveis correspondeu a 42,9% em 2017, enquanto na matriz energética mundial representou apenas 13,7% em 2015. No que tange especificamente à matriz elétrica, o Brasil apresentou 80,4% de renovabilidade em 2017, quase 4 vezes à média mundial de 22,8% em 2015. Isso significa que as emissões de GEE do setor de energia por unidade de energia consumida no Brasil são pequenas comparativamente a outros países (BEN, 2018).

Ainda assim, dos maiores desafios para o Brasil, se concentra no setor energético. Reduzir as emissões implica em se manter elevada a participação de fontes renováveis na matriz, ou seja, no setor elétrico é necessário expandir a matriz a partir de fontes de energia renováveis.

As medidas apresentadas, no horizonte de 2030, envolvem o aumento da participação da bioenergia (etanol, biomassa de cana, biodiesel entre outros) na matriz energética, ganhos (de 10%) de eficiência energética no setor elétrico, e no que tange as fontes renováveis de energia, as medidas envolvem a expansão da participação de fontes renováveis na matriz energética – entre 28 e 33%, excluindo hidrelétricas – e o alcance de 45% de participação efetiva de energia renováveis na composição da matriz energética nacional.

A Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) define o compromisso nacional voluntário – a nível internacional, pois tem força de lei a nível nacional – de redução de 36,1% a 38,9% das emissões projetadas até 2020. O decreto 7.390/10, que regulamenta a PNMC, instituiu o Plano Decenal de Energia - PDE como o plano setorial de mitigação e adaptação à mudança do clima do setor de energia (EPE, 2018).

O aproveitamento hidrelétrico ainda representa um elemento importante de ampliação de oferta de energia elétrica no SIN. A maior parte do potencial ainda a aproveitar encontra-se na região Norte e traz com ele uma série de desafios, principalmente de caráter ambiental, para sua utilização na expansão da oferta de energia elétrica (PDE 2027, 2018).

6. TORRE SOLAR COMO ALTERNATIVA

6.1 Histórico

No início da década de 80 foi construído o primeiro protótipo da Solar Updraft Tower, conhecida como “torre solar” ou “chaminé solar”, na cidade espanhola de Manzanares (Schlaich & Bergermann, 2011).

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 de “Proyecto de motor solar”.

O coronel do exército espanhol, Isidoro Cabanyes (1843 - 1916), responsável pela nova invenção, propôs uma chaminé com duas características: um coletor solar em sua base, com o objetivo de aquecer o ar interno, provocando uma corrente de ar ascendente pela chaminé, e uma espécie de hélice que, graças a corrente de ar interna, deveria rotacionar, gerando assim, trabalho mecânico, que poderia se transformar em energia elétrica.

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 150km ao sul de Madrid, na Espanha), com o financiamento do Ministério Federal de Pesquisa e Tecnologia da Alemanha (Bundesministerium für Forschung und Technologie – BMFT).

Figura 4: Protótipo da torre solar, em Manzanares, Espanha. – Fonte: Schlaich, Bergermann, 2011.

A torre de Manzanares tinha 194,6 metros de altura e uma capacidade de gerar 50kW de potência. O objetivo da construção desse protótipo era verificar e analisar o desempenho e o potencial real da torre, uma vez que ela foi projetada a partir de cálculos e estudos teóricos. Ela esteve em operação por sete anos, de 1982 a 1989.

6.2 Conceito

Usinas de chaminé solar – ou chaminé termosolar – são grandes usinas de geração de energia renovável, construídas em regiões com altas taxas de insolação. Consistem, tipicamente, num coletor solar circular para gerar ar aquecido, uma chaminé alta no centro do coletor, por onde o ar aquecido sobe, e turbinas e geradores para extrair a eletricidade derivada da diferença de pressão (Cottam et al, 2019).

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.

Apesar de robusta e imponente, o princípio de funcionamento utilizado para construir a ST é simples: uma ampla área é encoberta pelo que é chamado de “telhado de vidro”. Abaixo desse telhado o calor do sol aquece o ar, causando uma espécie de “efeito estufa”. O ar quente, que é menos denso, tende a subir e é aspirado pelo tubo cilíndrico vertical (efeito chaminé). O tubo deve ser de um diâmetro que proporcione grande pressão interna, tal que a velocidade do ar seja suficiente para rotacionar as turbinas que estão dispostas desde o início até o fim do perímetro do tubo. Essas turbinas, acopladas a geradores exercem uma força que, por sua vez, é transformada em eletricidade.

6.3 Princípio de funcionamento

Todo o funcionamento da Torre Solar tem como foco principal sua fonte: o sol.

O sol tem cerca de 4,6 bilhões de anos e deve continuar existindo por, aproximadamente, mais 5 bilhões de anos. Ou seja, é fonte ilimitada de energia. Segundo dados da Eletrobrás: “O sol fornece, em um único dia, mais energia que a demanda de todos os habitantes do planeta durante um ano.”.

Como foi dito anteriormente, a Torre Solar utiliza-se de dois fenômenos principais, que partem de princípios físicos: o efeito estufa e o efeito chaminé.

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. Sendo assim, quanto mais altos forem os orifícios de saída e quanto mais baixos forem os de entrada, mais intenso será o fluxo de ar.

O princípio físico envolvido no efeito estufa é relacionado aos processos de condução de calor (ou condução térmica), que é o processo de transferência de energia por calor, que ocorre quando há dois ou mais sistemas em contato e com diferentes temperaturas. Neste processo o que ocorre é uma troca de energia cinética entre partículas microscópicas do meio (que podem ser moléculas, átomos ou elétrons livres), onde as partículas menos energéticas obtêm mais energia através de colisões com partículas mais energéticas.

Essa propagação de calor entre corpos pode ocorrer de três maneiras: condução, convecção e irradiação.

No caso do efeito estufa, a irradiação é o processo responsável pela transmissão de calor. Diferente da condução e da convecção, a irradiação não necessita de meio material para ocorrer, ela ocorre perfeitamente no vácuo, através da radiação.

O termo radiação refere-se à emissão contínua de energia, da superfície de um determinado corpo. Essa energia é conhecida como energia radiante, sendo transportada por ondas eletromagnéticas, com diferentes comprimentos de onda e frequência.

Portando, radiação solar nada mais é do que a emissão de energia através de ondas eletromagnéticas, que se propagam à velocidade da luz. Essas ondas são chamadas de ondas de calor ou calor radiante.

A radiação térmica, incidente em um determinado corpo, causa dois efeitos: absorção e reflexão. Pelo fato de serem ondas eletromagnéticas e estão sujeitas a serem absorvidas, transmitidas ou refletidas. Quanto mais escuro for o corpo atingido pela radiação, mais absorção de calor ocorrerá.

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

através da radiação solar. O solo e o telhado de vidro, juntos, funcionam como um coletor de ar.

Como foi dito anteriormente, o ar quente, dentro da Torre Solar, é produzido pelo efeito estufa. Esse efeito ocorre entre o solo e o telhado, ou seja, fazendo com que esses dois elementos formem 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 adjacentemente à base da torre, de modo que o ar é desviado para um movimento vertical, com o mínimo de perdas por atrito. Esta vidraça permite que a radiação solar penetre e retenha o calor, através 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 5: Princípio de funcionamento da Torre Solar – Fonte: Schlaich, Bergermann, 2011.

A torre, ou chaminé, pode ser considerada o motor térmico efetivo dessa usina termo solar. A chaminé é um tubo de pressão com baixa perda de carga por atrito. Há baixa perda, pois a velocidade do ar ascendente é praticamente proporcional ao aumento de temperatura do ar no coletor (ΔT) e com a altura da torre.

Em uma Torre Solar muito grande, a temperatura do coletor de ar pode variar, elevando-se entre 30 e 35 K (Kelvin), em relação à temperatura ambiente. Isso poderia produzir um

aumento de velocidade na corrente de ar de apenas 15 m/s. A maior parte do potencial de pressão disponível é utilizado pela turbina e por consequência não acelera o ar. Sendo assim, é possível entrar na instalação para uma possível manutenção, por exemplo, sem que haja perigo de altas velocidades do ar (Schlaich & Bergermann, 2011).

Segundo Schlaich & Bergermann, as turbinas estão presentes em toda a base da torre, no centro do coletor de ar. Através 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, através de turbinas revestidas, de maneira 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 do que a velocidade de uma turbina eólica.

A velocidade do ar antes e depois da turbina é aproximadamente a mesma. O resultado conseguido é proporcional ao produto do volume por unidade de tempo pelo diferencial de pressão sobre a turbina. Tendo como foco um rendimento máximo de energia, o objetivo do sistema de controle da turbina é maximizar o resultado em todas as condições de funcionamento. Para este fim, o passo da lâmina da turbina (pá) é ajustado durante a operação de regulação de potência, de acordo com a velocidade e fluxo do ar. Se os lados planos das lâminas forem perpendiculares ao fluxo de ar, a turbina não roda. Se as lâminas forem paralelas ao escoamento de ar, permitindo que o ar flua livremente, não existe qualquer queda de pressão na turbina e nenhuma eletricidade é gerada.

Entre estes dois extremos existe uma configuração de lâmina ideal: a saída é maximizada se a queda de pressão na turbina atingir cerca de 80% de todo o diferencial de pressão disponível. O atrito ideal depende das características do projeto, como por exemplo, o atrito por perda de pressão.

7. A TORRE SOLAR NO BRASIL

A Torre Solar não é apenas um projeto. Sua capacidade de funcionamento e eficácia já foram comprovadas através da construção do protótipo de Manzanares.

Muitos estudos de viabilidade da Torre Solar têm sido reportados pelo mundo devido suas consideráveis implicações potenciais (P. Guo et al, 2018).

O sol é uma fonte inesgotável que se estende por todo o território brasileiro, na maior parte do ano e em todas as estações. E ainda que os níveis de insolação variem de acordo com a região, com a correta utilização e aplicação desse recurso, todas as regiões brasileiras podem ser beneficiadas.

Com base nos princípios físicos de funcionamento da Torre Solar, não apenas para aplicação nas regiões de maior índice de radiação solar, mas também nas regiões onde esse índice é menor, pode-se desenvolver um novo modelo de usina termosolar, utilizando-a como um novo meio de geração de energia limpa para o território nacional, além da possibilidade de desenvolvimento social na região de sua construção, uma vez que energia está intimamente associada à nucleação de parques industriais, projetos agrícolas, entre outros. Em suma, uma usina termosolar contempla o tripé “sustentabilidade, preservação do meio ambiente, desenvolvimento social”.

Os dados da tabela a seguir são fornecidos pela equipe desenvolvedora do projeto original. A eletricidade gerada anualmente considera um índice anual de radiação solar global horizontal de 1800kWh/m²ano. São considerados 3 valores para a capacidade instalada. Obviamente que os valores em questão formam um modelo a ser adaptado após os estudos regionais necessários.

Tabela 1: Dimensões típicas e eletricidade gerada.

CAPACIDADE INSTALADA	50	100	200	(MW)
ALTURA DA TORRE	750	1000	1000	(m)
DIÂMETRO DA TORRE	90	110	120	(m)
DIÂMETRO DO COLETOR	3750	4300	7000	(m)
ELETRICIDADE GERADA	120	250	532	(GWh/ano)

Fonte: Schlaich, Bergermann, 2011.

A fim de prever a geração de eletricidade e assim nivelar o custo de energia esperado, é necessário realizar uma previsão precisa sobre a potência de saída máxima e anual necessária, dependendo das condições ambientais da localização geográfica e ainda a dimensão e o design da usina (Cottam et al, 2019).

7.1 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 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 desta tecnologia de geração (INPE, 2017).

A análise geográfica, fundamental para atestar a viabilidade da construção da Torre Solar no Brasil, pode ser delineada analisando a topografia do território nacional, suas variações climáticas, o índice de precipitação, a variação de temperatura e, finalmente, o índice de radiação solar.

Todas as informações foram analisadas a partir dos dados fornecidos no Atlas Brasileiro de Energia solar, atualizado e publicado em 2017, pelo Instituto Nacional de Pesquisas Energéticas (INPE).

O clima do Brasil é diversificado em consequência de fatores variados, como a extensão territorial, o relevo e a dinâmica das massas de ar (INPE, 2017).

O relevo, por exemplo, influencia nas condições de tempo e clima de determinada região. Quanto mais elevado um ponto, mais frio ele será. Além disso, a altitude tende a formar nebulosidade, por conta da condensação.

A dinâmica atmosférica é de suma importância porque atua diretamente tanto na temperatura quanto na precipitação, provocando as diferenças climáticas regionais (INPE, 2017).

Figura 6: Topografia no território brasileiro – Fonte: INPE, 2017.

O mapa representado na figura 6 ilustra a topografia do território brasileiro. Já a distribuição dos climas característicos de cada região é ilustrada na figura 7. A maior parte de sua extensão é composta pelos climas tropical e subtropical, no entanto, o sertão nordestino apresenta o clima semiárido.

Figura 7: Clima no território brasileiro – Fonte: INPE, 2017.

O Brasil, dada sua extensão, apresenta diferentes latitudes e portanto, não existe um único padrão de chuvas em todo o seu território. Como pode-se notar no mapa da Figura 8, o índice de precipitação anual é diverso e depende da característica de cada região analisada. Há regiões com precipitação média bastante elevada, como a Amazônia, e regiões com precipitação muito reduzida, como o semiárido nordestino (de duas a sete vezes menor que a observada na Amazônia) (INPE, 2017).

Figura 8: Precipitação anual no território brasileiro, em mm – Fonte: INPE, 2017.

Os dois mapas seguintes (Figuras 9 e 10), coletados através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), ilustram a média de temperatura, em todo o território nacional, em 2018 e em 2008 respectivamente. Comparando as mudanças de temperatura ao longo dos últimos, é possível observar que não houve grande variação de temperatura nos setores do semiárido brasileiro.

Figura 9: Temperatura média no território brasileiro em 2018, em °C – Fonte: INMET, 2019.

Figura 10: Temperatura média no território brasileiro em 2008, em °C – Fonte: INMET, 2019.

7.1.1 Energia solar

A energia solar é uma das alternativas de fonte primária para geração de energia mais promitentes do cenário atual.

A produção global de energia solar térmica em 2017 correspondeu a uma economia de 41,7 milhões de toneladas de petróleo e 134,7 milhões de toneladas de CO₂. Isso mostra a contribuição significativa dessa tecnologia para os objetivos climáticos globais (SHC/IEA, 2018).

Em 2017, a energia solar fotovoltaica teve a maior taxa de crescimento global, com 33% de capacidade adicional e foi seguida pela energia eólica, que aumentou sua capacidade instalada em 11% (SHC/IEA, 2018).

A disponibilidade e a variabilidade do recurso energético solar estão intrinsecamente associadas às condições de tempo e clima de cada região. Isso ocorre porque sistemas meteorológicos provocam alterações na nebulosidade e nas concentrações dos gases e aerossóis, afetando os processos radiativos que atenuam a radiação solar ao longo de seu percurso na atmosfera (INPE, 2017).

Cerca de 81% da energia irradiada pelo sol, que chega ao sistema Terra/atmosfera alimenta todos os processos térmicos, dinâmicos e químicos, sejam eles naturais ou artificialmente desenvolvidos, com aplicação do conhecimento científico e tecnológico produzido pela sociedade. Dentre os processos naturais, a fotossíntese (produção de biomassa), o ciclo hidrológico (evaporação/ precipitação), a dinâmica da atmosfera e oceanos (ventos e correntes oceânicas) são exemplos com os quais estamos interagindo de forma rotineira (INPE, 2017).

A taxa de energia emitida pelo Sol é aproximadamente constante há bilhões de anos com uma potência atual da ordem de $3,86 \times 10^{26}$ W. A temperatura efetiva na superfície do Sol é da ordem de 5778 K (5505° C) (INPE, 2017).

A disponibilidade do recurso energético solar e sua variabilidade espacial e temporal estão intrinsecamente relacionadas a conceitos astronômicos. O primeiro dos fatores a serem considerados é a posição relativa entre o sol e a Terra. A Terra orbita o sol a uma distância média de cerca de 150 milhões de quilômetros, completando um ciclo a cada 365,25 dias solares. Ao longo desse período, a distância varia entre 1,47.108 km e 1,52.108 km e, como resultado, o fluxo de radiação solar (irradiância solar) oscila entre 1.325 W/m² e 1.412W/m². O

valor médio da irradiância solar igual a 1.366 W/m^2 é definido como a constante solar (NREL, 2019).

A irradiância solar – dada em watts por metro quadrado (W/m^2) – que incide em uma superfície é composta por suas componentes direta e difusa. A irradiância solar direta apresenta direção de incidência na linha imaginária entre a superfície e o Sol e representa a parcela que não sofreu os processos radiativos de absorção e espalhamento que ocorrem na atmosfera. A componente difusa engloba a radiação proveniente de todas as demais direções que são decorrentes dos processos de espalhamento pelos gases e particulados presentes na atmosfera. A integral da irradiância no tempo é definida como irradiação solar (Wh/m^2) ou energia radiante incidente acumulada em um intervalo de tempo (INPE, 2017).

7.1.2 Irradiação solar no Brasil

Os próximos mapas (Figuras 11 a 16) apresentam as componentes de irradiação solar em todo território nacional, são elas: irradiação global horizontal (H), irradiação direta normal (H_n) e irradiação no plano inclinado na latitude (H_i).

Na escala anual, verificou-se que todas as regiões apresentaram tendência significativa de aumento da irradiação global, com exceção da região Sul, onde o teste indicou redução da incidência de irradiação solar, porém sem significância estatística. Para as demais regiões, o teste indicou tendências de aumento da irradiação global com taxas de crescimento anual entre 10 e 20 Wh/m^2 . Esse resultado, embora estatisticamente significativo, não permite inferir uma conexão com os efeitos das mudanças climáticas globais, visto que a série temporal de irradiação utilizada não abrange um período longo suficiente para uma análise conclusiva sobre essa tendência, podendo ela ser devida à variabilidade climática natural (INPE, 2017).

Figura 11: Média anual da irradiação global horizontal, em $\text{Wh/m}^2.\text{dia}$ – Fonte: INPE, 2017.

Figura 12: Médias mensais da irradiação global horizontal, em Wh/m².dia – Fonte: INPE, 2017.

Figura 13: Média anual da irradiação direta normal, em $\text{Wh/m}^2.\text{dia}$ – Fonte: INPE, 2017.

Figura 14: Médias mensais da irradiação direta normal, em $\text{Wh/m}^2.\text{dia}$ – Fonte: INPE, 2017.

Figura 15: Média anual da irradiação no plano inclinado da latitude, em $\text{Wh/m}^2.\text{dia}$ – Fonte: INPE, 2017.

Figura 16: Médias mensais da irradiação no plano inclinado da latitude, em Wh/m².dia – Fonte: INPE, 2017.

Analisando os mapas da 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. Pode-se afirmar que em todo o território brasileiro há condições para produção de calor para o setor industrial e agropecuário em temperaturas abaixo de 100°C , o que engloba uma ampla gama de processos. Há também a possibilidade de atender os processos acima de 100°C se considerarmos o uso da energia solar para pré-aquecimento. O mapa de irradiação solar direta (Figura 17), possui uma área em destaque com irradiação anual acima de 1800 Wh/m^2 , região que pode ser utilizada em diversas aplicações de geração de calor.

Figura 17: Média anual da irradiação direta normal, em $\text{kWh/m}^2.\text{ano}$ – Fonte: INPE, 2017.

De fato, a faixa, que vai desde o Nordeste do Brasil, espalhando-se pela região Centro-Oeste e 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 2000 kWh/m² e baixa nebulosidade apresentam esse potencial.

Os melhores locais para implantação de usinas solares térmicas concentradas – Concentrated Solar Power (CSP) – estão no semi-árido 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).

7.2 O projeto

7.2.1 Localização

O protótipo espanhol, com um pico de energia de aproximadamente 50kW, tinha uma chaminé de aço de 194,6 metros de altura, um coletor de 122 metro de raio e uma única turbina de eixo vertical, que foi instalada a 9 metros acima do nível do solo. O protótipo espanhol trabalhava cerca de 8 ou 9 horas por dia (P. Guo, 2018).

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

Valores maiores que 2.2 MWh/m² foram encontradas principalmente no semiárido, região do nordeste brasileiro, onde a baixa precipitação e grande número de dias de céu claro são as principais características do clima (Martins et al, 2012).

Os mapas a seguir incluem a informação geográfica dos principais rios e rede elétrica, respectivamente, juntamente com dados de energia solar cumulativa.

Figura 18: Região em conjunto com áreas inundadas e rios principais – Fonte: Martins et al, 2012.

Figura 19: Região em conjunto com linhas de transmissão existentes – Fonte: Martins et al, 2012.

Ainda, o mapa anterior mostra que a região nordeste é a área mais favorável para investimentos em usinas solares térmicas concentradas, isso porque essa região recebe uma alta energia solar cumulativa anual e apresenta baixa variação ao longo do ano. Levando em consideração apenas a região nordeste, os mapas anteriores incluem informação geográfica das principais vias fluviais e da rede elétrica em conjunto com os dados de energia solar. A área em laranja é a melhor região para aplicação de usinas solares. Além disso, nessa região existem linhas de transmissão pertencentes aos Sistema Interligado Nacional (SIN) de 230kV, 440kV E 550kV (Martins et al, 2012).

Além disso, 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).

A figura 20 indica regiões que possuem uma média global de radiação solar acima dos 5 kW/m²/dia durante o ano, o que leva a um total anual acima de 1800 kWh/m². Nessas mesmas regiões, segundo Martins et al, a velocidade média dos ventos é menor do que 3,5 m/s.

Figura 20: Regiões com média global de radiação solar maior que 5 kWh/m²– Fonte: Martins et al, 2012.

No mapa seguinte (Figura 21), são excluídas regiões inapropriadas para a aplicação do projeto, uma vez que representam áreas que contém florestas, reservas ambientais, reservas indígenas, rios e lagos.

Figura 21: Regiões apropriadas para a aplicação do projeto – Fonte: Martins et al, 2012.

A área azul da Figura 21 é localizada, em sua maior parte, nos estados do Maranhão e do Piauí, e reúne as melhores condições, e obtém um grande potencial técnico para a implantação do projeto da Torre Solar, além disso, a área também está próxima da rede de distribuição elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN).

7.2.2 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 através da fórmula abaixo, 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 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 mais leve de ar, 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) são assumidas como constantes e equivalem, respectivamente, a 42%, 85% e 80% (B. Ali, 2017).

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

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

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_o , que é a temperatura de entrada do coletor, dada em Kelvin.

A velocidade do ar na chaminé pode ser calculada como:

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

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

Sendo assim, Cottam et al, após uma série de estudos concluiu que plantas menores, com coletores com cerca de 3000 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 do aumento de potência.

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

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

A produção de eletricidade pode ser calculada através 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).

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

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

Assumindo um valor da radiação global horizontal de 2200 kWh/m² e seguindo a orientação de Cottam et al, supondo o coletor de 400m de diâmetro, a área do coletor é calculada:

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

A entrada de energia solar é calculada, considerando a radiação global horizontal (2200 kWh/m²) e a área do coletor:

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

Seguindo a literatura, se considera 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:

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

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

Sendo assim, pode-se variar a altura da chaminé em forma de experimentar a melhor eficiência para o sistema, como é demonstrado abaixo.

Considerando a altura da chaminé como 1000 metros:

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

Considerando a altura da chaminé como 500 metros:

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

Considerando a chaminé de 1000 metros de altura, a velocidade do ar dentro da chaminé pode ser calculada:

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

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

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

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:

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

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

$$\frac{753600 kWh}{24} \frac{1}{h} = 31400 kW = 31,4 MW \quad [\text{Eq. 17}]$$

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

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

Considerando a altura de 1000 metros da chaminé, e sua eficiência de 32%:

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

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 intensificarem os estudos acerca do aumento da eficiência dos sistemas em separado, especialmente no que diz respeito a chaminé – ou torre – da usina termosolar.

Existem estudos de engenharia em andamento em diversos países, pesquisas propondo novos modelos matemáticos, principalmente a China.

No entanto, apesar de apresentar baixo rendimento, a Torre Solar se mostra funcional e capaz de gerar energia elétrica 100% limpa.

7.3 Avaliação socioambiental e desenvolvimento sustentável

A avaliação socioambiental pode ser realizada sob duas perspectivas: uma de forma regional e mais 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 termo solares 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, 2018).

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 esta 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, pois passou a ser 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 na região, tal qual uma usina termosolar, 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 o 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 analisamos a área utilizada para a construção de uma Torre Solar e a equipamos a uma usina hidroelétrica, por exemplo, pode-se excluir do escopo a enorme e irreversível perda de biodiversidade, causa 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, é independente de água para resfriamento durante a operação, 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, nem antes, nem durante e nem após o processo de transformação de energia.

A maneira como a Torre Solar gera energia não impacta de forma negativa na 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 para desacelerar o aquecimento global.

7.4 A Torre Solar no mundo

O maior protótipo, até hoje, de capacidade de 50kW, foi construído e operado em Manzanares, na Espanha. Nenhuma outra usina comercial em grande escala foi construída até o presente, por questões relacionadas a viabilidade econômica e aos desafios tecnológicos para a construção da chaminé, por conta da altura (Cottam et al, 2019).

No entanto, existem inúmeras pesquisas sendo realizadas ao redor do mundo, com o objetivo de aprimorar e adaptar a Torre Solar para a construção em diferentes regiões.

Segundo P. Guo et al, Arábia Saudita, Norte do Chipre, Líbano, Irã, Croácia, Egito, Emirados Árabes, Argélia e Botswana trabalham atualmente em estudos de viabilização para a construção de Torres Solares.

A China, por sua vez, apresenta pelo menos 8 pesquisas, entre estudos de viabilidade e projetos experimentais, para a construção da Torre Solar.

Os Estados Unidos apresentam três projetos, de cunho experimental, sendo aplicados na Flórida, no Novo México e também no Texas.

Além disso, Turquia, Austrália, Jordânia, Síria, Índia, Ilhas Fiji e Japão já trabalham com estudos experimentais.

Uma série de estudos está sendo realizada com a finalidade de aprimorar o desempenho da Torre Solar e aumentar sua viabilidade para expandir sua aplicação, uma vez que seu funcionamento e sua performance já puderam ser comprovados teórica e experimentalmente.

8. CONCLUSÃO

A necessidade cada vez maior por energia tem levado a uma busca ininterrupta por novas maneiras de geração. No Brasil, até há pouco 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 de altos índices de radiação solar e, conseqüentemente, altas temperaturas durante todas as estações do ano, em determinadas regiões. Além disso, as principais regiões que acumulam estas 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. Este 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 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, tal 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 emitidos 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 flora locais. Portanto, trata-se de um recurso renovável que gera efeitos deletérios irreversíveis ao meio ambiente e aos seres humanos, que o digam as tribos indígenas e populações ribeirinhas no caso da construção do Complexo de Belo Monte.

Petróleo, carvão e gás natural são combustíveis triplamente inconvenientes, ou seja, são não-renováveis, altamente poluentes (o gás natural em menor grau) e muito mais caros. 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.

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, através das termelétricas, como é o caso do Brasil.

A grande oportunidade que há para contrabalancear 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, que se aplique no cotidiano tecnologias limpas, que não agredam 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 a qualquer outro fator.

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

Num país de índices de radiação solar tão elevados, o uso de combustíveis fósseis altamente poluentes, emissores dos principais gases causadores do aquecimento global e suas constantes e imprevisíveis mudanças climáticas, o baixo investimento e estímulo ao uso e aplicação da energia solar, é sinônimo de atraso.

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 aplicar 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 tem comprometido a eficiência global, diminuindo o rendimento da Torre Solar. A grosso modo, as fontes atuais de geração de energia ainda se mostram mais eficazes.

Muitos pesquisadores analisaram o fluxo de características do sistema 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 no 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,

a 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 ainda a Torre Solar exige melhorias para que possa se tornar competitiva com as outras formas de geração de energia.

Inovar é preciso. Principalmente quando dessa inovação pode-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.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas da Energia – Aspectos Institucionais. 2018. Brasília, Brasil.
- [2] BABKIR ALI. Techno-economic optimization for the design of solar chimney power plants. 2017. Alberta, Canada.
- [3] BP ENERGY – BP Energy Outlook: Statistical Review of World Energy 2019. 2019.
- [4] EMBRAPA. Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira. 2018. Brasília, Brasil.
- [5] EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Sistema de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro. <https://gisepeprd.epe.gov.br/webmapepe/>. Site visitado em Maio/2019.
- [6] IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/semiarido.shtm?c=4>. Site visitado em Maio/2019.
- [7] IEA – International Energy Agency. CO₂ Emissions from Fuel Combustion 2018. 2018. Paris, França.
- [8] INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. <http://www.inmet.gov.br/>. Site visitado em Julho/2019.
- [9] INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Atlas brasileiro de energia solar. 2017. São José dos Campos, Brasil.
- [10] IRENA – International Renewable Energy Agency. Global energy transformation: A roadmap to 2050. 2019. Abu Dhabi.
- [11] MARTINS, F. R., ABREU, S. L., PEREIRA, E. B. Scenarios for solar thermal energy applications in Brazil. Energy Policy, Guildford. 2012. São Paulo, Brasil.

- [12] MDA – Ministério da Agricultura, Agropecuária e Abastecimento. <http://www.mda.gov.br/sitemda/noticias/caatinga-regi%C3%A3o-mais-ruralizada-do-brasil>. Site visitado em Maio/2019.
- [13] MME/EPE – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. BEN - Balanço Energético Nacional 2018. 2018. Rio de Janeiro, Brasil.
- [14] MME/EPE – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. BEN - Balanço Energético Nacional 2019. 2019. Rio de Janeiro, Brasil.
- [15] MME/EPE – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. Energia Termelétrica. 2016. Rio de Janeiro, Brasil.
- [16] MME/EPE – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. PDE - Plano Decenal de Expansão de Energia 2024. 2015. Rio de Janeiro, Brasil.
- [17] MME/EPE – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. PNE - Plano Nacional de Energia 2030. 2007. Rio de Janeiro, Brasil.
- [18] 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.
- [19] MME/EPE – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. PDE - Plano Decenal de Expansão de Energia 2027. 2018. Brasília, Brasil.
- [20] MME/EPE – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética. Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050. 2018. Brasília, Brasil.
- [21] 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.

- [22] NREL – The National Renewable Energy Laboratory. Solar Resource Glossary. <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/solar-glossary.html>. Site visitado em Junho/2019.
- [23] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Plano da Operação Elétrica 2017/2018. 2016. Brasília, Brasil.
- [24] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Plano da Operação Energética 2016/2020. 2016. Brasília, Brasil.
- [25] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. www.ons.gov.br. 2019. Site visitado em 05/07/2019.
- [26] ONU – Organização das Nações Unidas. Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC): COP-21. 2015. Paris, França.
- [27] P.J. COTTAM, P. DUFFOUR, P. LINDSTRAND, P. FROMME. Solar chimney power plants – Dimension matching for optimum performance. 2019. Londres, Reino Unido.
- [28] PENGHUA GUO, TIAN TIAN LI, BEN XU, XINHAI XU, JINGYIN LI. Questions and current understanding about solar chimney power plant: A review. 2018. China.
- [29] SCHLAICH, J., BERGERMANN, R., SCHIEL, W., WEINREBE, G. Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems. Schlaich Bergermann und Partner. 2011. Stuttgart, Alemanha.
- [30] SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. 2019. Brasil.
- [31] SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Emissões dos setores de energia, processos industriais e uso de produtos. 2018. Brasil.

- [32] SHC/IEA – Solar Heating & Cooling Programme. International Energy Agency. Solar Heat Worldwide. 2018. Gleisdorf, Austria.
- [33] TEIXEIRA, MYLENE N. O sertão semiárido. Uma relação de sociedade e natureza numa dinâmica de organização social do espaço. Revista Sociedade e Estado. 2015.
- [34] The World Bank – International Bank for Reconstruction and Development. Tracking SGD7: The Energy Progress Report. 2018. Washington, EUA.
- [35] The World Bank – International Bank for Reconstruction and Development. Tracking SGD7: The Energy Progress Report. 2019. Washington, EUA.
- [36] TIEPOLO, G. M., URBANETZ, J., PEREIRA, E. B., PEREIRA, S. V., ALVES, A. R. Energia solar no Estado do Paraná - Potencial, barreiras e políticas públicas. X CBPE, Gramado, 2016.
- [37] WEC – World Energy Council. World Energy: Issues Monitor 2018. 2018. Londres, Reino Unido.