

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS DE CURITIBA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ED ÁKIO SANTOS PASSOS
MATHEUS RUDNICK FRAGOSO**

**ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE UMA USINA
HELIOTÉRMICA COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA
2020**

**ED ÁKIO SANTOS PASSOS
MATHEUS RUDNICK FRAGOSO**

**Estudo da viabilidade econômica de uma usina heliotérmica
com armazenamento de energia**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado à disciplina de TCC 2, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista

Orientadora: Prof. MSc. Annemarle
Gehrke Castagna

**CURITIBA
2020**

Ed Ákio Santos Passos
Matheus Rudnick Fragoso

Estudo da viabilidade econômica de uma usina heliotérmica com armazenamento de energia

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção dos títulos de Engenheiro de Controle e Automação e Engenheiro Eletricista, dos cursos de Engenharia de Controle e Automação e de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 26 de novembro de 2020.

Prof. Antonio Carlos Pinho, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemahlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Annemahlen Gehrke Castagna, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Álvaro Augusto de Almeida, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Andrea Lucia Costa, Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo Barcik, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

PASSOS, Ed Ákio Santos; FRAGOSO, Matheus Rudnick. **Estudo da viabilidade econômica de uma usina heliotérmica com armazenamento de energia**. 2020. 67 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

O estudo realizado analisa a viabilidade da instalação, no território brasileiro, de uma usina heliotérmica para geração alternativa de energia elétrica. O embasamento bibliográfico em dados econômicos de mídias especializadas e dados técnicos de trabalhos científicos foi utilizado para obter parâmetros de custos de construção e facilidade de instalação nos aspectos ambientais e sociais. Pretende-se com este estudo abordar aspectos importantes acerca de uma tecnologia de comercialização recente, com custos decrescentes e alto potencial econômico, por ter se mostrado uma aplicação viável tanto de forma econômica como social/ambiental. A pesquisa sobre as usinas já instaladas ao redor do mundo mostrou que os custos dessas plantas estão decrescendo em uma taxa elevada, algo próximo a 53% entre 2010 e 2019, tornando-se competitivos frente a outras fontes alternativas de geração de energia, como a fotovoltaica residencial, a nuclear e a geração a gás natural. Ao final, conclui-se, entre outros fatores que a tecnologia ainda encontra-se em estado incipiente, são necessários vários pontos convergentes para a viabilidade da instalação, o preço está em processo de queda e o sistema elétrico brasileiro tal qual encontra-se hoje comportaria muito bem uma usina com este princípio de geração e armazenamento.

Palavras-chave: Planta heliotérmica. Energias renováveis. Viabilidade. Impactos ambientais. Energia solar concentrada.

ABSTRACT

PASSOS, Ed Ákio Santos; FRAGOSO, Matheus Rudnick. **Feasibility study of a heliothermic plant with energy storage**. 2020. 67 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Federal Technology University - Paraná. Curitiba, 2020.

The study carried out aims to analyze the feasibility of installing a heliothermic plant for alternative generation of electric energy in the Brazilian territory. The bibliographic basis on economic data from specialized media and technical data from scientific works was used to obtain parameters of construction costs and ease of installation in environmental and social aspects. This study intends to address important aspects about a recent commercialization technology with decreasing costs, approximately 53% between 2010 and 2019, and high economic potential, as it has proved to be a feasible application in economics, socials and environmental terms. Research on plants already installed around the world has shown that the costs of these plants are decreasing at a high rate, becoming competitive against other alternative sources of energy generation, such as residential photovoltaic, nuclear and generation by natural gas. At end, it follows, among other factors, that this technology finds in an incipient phase of development, where are necessaries many convergent points to the viability of implementation, the price is in constant process of falling and the Brazilian electrical system, as it is today, a plant with this generation and storage principle would be very well suited.

Keywords: Heliothermic plant. Renewable energies. Feasibility. Environmental impacts. Concentrating solar power.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Energética Mundial.....	10
Figura 2 - Participação das fontes de geração na capacidade instalada em dezembro/2024	14
Figura 3 - Tipos de Energia Heliotérmica.	19
Figura 4 - Usinas Heliotérmicas ao redor do mundo.	21
Figura 5 - Projeções de Mercado para o desenvolvimento do CSP entre 2015 e 2050	25
Figura 6 - Potência Instalada acumulada entre 2015 e 2050	26
Figura 7 - Ciclo de geração termelétrica.....	29
Figura 8 - Participação das fontes de geração na capacidade instalada em dezembro/2024	29
Figura 9 - Tecnologia CSP com receptor central.....	30
Figura 10 - Tecnologia CSP com receptor central (adaptado).	32
Figura 11 - Média anual de irradiação solar na América do Norte.	37
Figura 12 - Representação da Usina Crescent Dunes com algumas informações.....	39
Figura 13 - Dados da geração mensal de energia na planta Crescent Dunes em megawatt-hora	40
Figura 14 - Custo Nivelado de Energia estimado para os EUA em 2020	43
Figura 15 - LCOE das diferentes tecnologias, tamanhos e armazenamentos em CSP	44
Figura 16 - LCOE da tecnologia CSP entre 2010 e 2022.....	47
Figura 17 - Mapa da Bahia com dados da Irradiação Solar.	52
Figura 18 - Precipitação média anual da Bahia.....	53
Figura 19 - Mapa Rodoviário da microrregião de Juazeiro, Bahia.....	55
Figura 20 - LCOE das Fontes Renováveis entre 2010 e 2019	58

LISTA DE ABREVIÇÕES E SIGLAS

ARENA – *Australian Renewable Energy Agency*

BBC – *British Broadcasting Corporation*

BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

Cepel – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CSP – *Concentrating Solar Power*: Concentração de potência Solar – conceito que indica o princípio de geração utilizado

DNI – *Direct Normal Irradiance*: Irradiação que chega diretamente ao receptor solar

EIA – *Energy Information Administration*

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EUA – Estados Unidos da América

GHI – *Global Horizontal Irradiation*: Irradiação global horizontal

GW – Giga Watt: unidade de Potência do Sistema Internacional com o prefixo multiplicador de 1.000.000 de vezes

h – Horas

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBICT – Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia

IEA – *International Energy Agency*

IRENA – *International Renewable Energy Agency*

km – Quilômetro: unidade de distância do Sistema Internacional equivalente a mil metros.

kV – Quilo Volts: unidade de Tensão do Sistema Internacional com o prefixo multiplicador de 1.000 vezes.

kW – Quilo Watt: unidade de Potência do Sistema Internacional com o prefixo multiplicador de 1.000 vezes

LCOE – *Levelized Cost Of Energy*: Custo Nivelado de Energia

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MME – Ministério de Minas e Energia

MW – Mega Watt: unidade de Potência do Sistema Internacional com o prefixo multiplicador de 1.000.000 vezes

ONS – Operador Nacional do Sistema

REN – Resolução Normativa

SIN – Sistema Interligado Nacional

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 TEMA.....	11
1.1.1 Delimitação do Tema	11
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	12
1.3 OBJETIVOS.....	12
1.3.1 Objetivo Geral	12
1.3.2 Objetivos Específicos	13
1.4 JUSTIFICATIVA.....	13
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 A FONTE HELIOTÉRMICA	18
2.1 PRESSUPOSTOS HISTÓRICOS	19
2.2 A FONTE HELIOTÉRMICA NO MUNDO	20
2.3 A FONTE HELIOTÉRMICA NO BRASIL	22
2.4 TENDÊNCIAS A CURTO, MÉDIO E LONGO PRAZO	23
3 GERAÇÃO DE ENERGIA HELIOTÉRMICA	28
3.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO	28
3.1.1 A Geração Termelétrica.....	28
3.1.2 A Geração Heliotérmica.....	29
3.1.3 O Armazenamento de Energia	31
3.2 CONCEITOS DA CONSTRUÇÃO E MANUTENÇÃO	32
3.2.1 Discussões Pré-Construção	33
3.2.2 Construção	34
3.2.3 Finalização e Ajustes	35
3.2.4 Operação e Manutenção	35
4 ANÁLISE DA USINA DE CRESCENT DUNES, EUA	36
4.1 INTRODUÇÃO	36
4.2 O LOCAL.....	36
4.3 DETALHES TÉCNICOS DA USINA	37
4.4 CONSTRUÇÃO E CONTRATAÇÃO DA ENERGIA	39
4.5 DIFICULDADES E DESAFIOS	40
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
5 VIABILIDADE DA FONTE HELIOTÉRMICA	42
5.1 ANÁLISE ECONÔMICA.....	42
5.1.1 Custos de Construção.....	44

5.1.2 Custos de Operação e Manutenção	45
5.1.3 Tendência de Queda do LCOE	46
5.2 ANÁLISE AMBIENTAL	47
5.3 VIABILIDADE NO CONTEXTO BRASILEIRO.....	49
6 ESTUDO NO CONTEXTO BRASILEIRO	51
6.1 CIDADE DE JUAZEIRO, BAHIA, BRASIL.....	51
6.1.1 O Local	51
6.1.2 Irradiação Solar e Precipitação	52
6.1.3 Análise Demográfica e de Logística	53
6.1.4 Análise do Sistema Elétrico.....	55
6.2 ASPECTOS FINANCEIROS BRASILEIROS	56
7 CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS.....	61

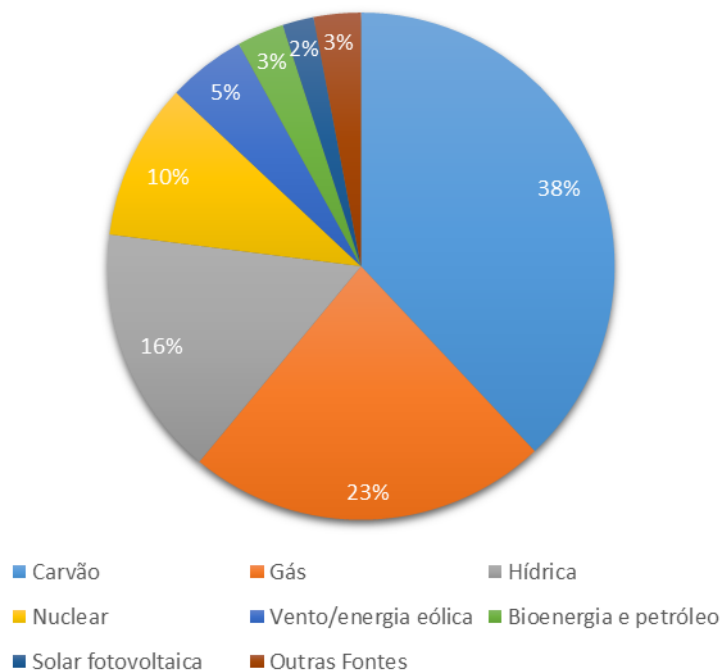
1 INTRODUÇÃO

Com os experimentos de Benjamin Franklin, James Watt e Michael Faraday, entre outros, foi possível estabelecer um princípio totalmente novo e inesperado de produção, condução e utilização da energia: aquilo que hoje é conhecido como eletricidade.

Durante as primeiras décadas do uso de energia elétrica em escala comercial, a principal preocupação era em termos quantitativos, de forma a proporcionar a todos o uso da mesma. Depois deste período inicial, logo vieram outros dois fatores de peso a serem considerados: segurança e qualidade.

No cenário atual, tem-se uma matriz energética mundial ainda dominada por fontes não renováveis (IEA, 2019) como mostrado na Figura 1. É buscado, porém, de forma ostensiva, a substituição dessas fontes por outras que estão sendo descobertas desde o século passado, menos poluentes.

Figura 1 - Matriz Energética Mundial.



FONTE: (IEA, 2019)

A Revista Brasileira de Energias Renováveis (2014), aponta que a energia da radiação solar que incide sobre a Terra é equivalente a 10.000

vezes toda a energia utilizada no mundo atualmente. Ou seja, esta é uma das energias mais abundantes disponíveis à humanidade provinda de um recurso que pode ser considerado inesgotável, o Sol.

1.1 TEMA

A primeira forma de se aproveitar a energia proveniente do Sol como eletricidade foi desenvolvida em 1954 quando Calvin Fuller realizou o processo de dopagem do Silício que, logo após, compôs a célula fotovoltaica (*NATIONAL INVENTORS*, 2017). Alguns anos depois, outros princípios de aproveitamento da energia elétrica de fontes solares foram desenvolvidos fisicamente, como: Calha Parabólica, Fresnel, Disco Parabólico e Torre Solar.

No âmbito dessas quatro tecnologias de aproveitamento da energia térmica do Sol, duas delas, a saber, as calhas parabólicas e as torres solares, destacaram-se no mercado, principalmente pela eficiência apresentada.

O método da Torre Solar, que começou sendo usado para gerar o vapor de usinas heliotérmicas em 2015, hoje conta com 10 grandes polos geradores espalhados pelo mundo, segundo um levantamento feito pela BBC em 2017. Em especial no estado do Nevada, EUA, esse tipo de geração foi acrescido de uma nova atribuição: armazenar energia utilizando sal derretido, projeto que foi desenvolvido pela *SolarReserve*. A energia solar que, até então, podia ser consumida apenas nos períodos de insolação, agora dispõe de um princípio de “bateria” à base de sal que possibilitará a continuidade do fornecimento também no período da noite e durante chuvas.

1.1.1 Delimitação do Tema

O trabalho em questão trata de analisar a viabilidade da operação de uma usina heliotérmica de grande capacidade de geração com os seguintes princípios: concentração de irradiação do Sol pela tecnologia de espelhos e torre solar, retenção de energia com sal aquecido e conversão de energia com usina térmica. Todo o estudo será focado para a instalação da fonte no semiárido nordestino e, mais especificamente, no interior do estado da Bahia,

levando-se em conta as condições climáticas, econômicas, sociais, rodoviárias, pluviométricas, demográficas e das redes elétricas do local.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Com o avanço da indústria e tecnologia, cresce também a preocupação com o meio ambiente. Encontrar soluções sustentáveis e eficientes passa a ser o objetivo primordial de pesquisas energéticas. Analisando, por exemplo, os objetivos da Organização das Nações Unidas para esta década, que visam garantir eletricidade para todo o mundo, é visível que alguns desafios precisam ser superados: é necessário que a energia seja garantida de forma limpa e sustentável, mas ainda há cerca de 15% da população mundial sem energia elétrica (PLAN, 2017). No Brasil essa quantidade é de cerca de 0,5%, que mesmo parecendo uma porcentagem pouco expressiva, se traduz em, aproximadamente, 1 milhão de habitantes (IEMA, 2019).

Para que esses objetivos sejam alcançados, é preciso que diferentes formas de geração de eletricidade, mescladas e adaptadas a diferentes contextos sociais e geográficos, sejam não só ambientalmente sustentáveis, mas economicamente também. Dentro do viés econômico, assumir que a geração heliotérmica precisa ser barata e possivelmente lucrativa é uma importante premissa deste trabalho. Partindo disso, o trabalho lançará mão de: analisar os possíveis custos de estabelecimento de uma usina solar, buscar informações sobre receita do projeto e situar a instalação e operação da usina dentro de uma determinada realidade regional para, através da análise de dados disponibilizados por administradoras de usinas já existentes, responder o seguinte questionamento: É viável a implementação de uma usina heliotérmica com armazenamento de energia elétrica no nordeste brasileiro?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Fazer uma análise de viabilidade da geração de energia heliotérmica com os princípios da torre solar, armazenamento de energia com sal derretido

e usina térmica no interior do estado da Bahia, levando-se em conta as condições climáticas, demográficas e econômicas do local.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Apresentar a tecnologia em questão, procurando abordar de forma concisa os tópicos que serão considerados na possível implementação do projeto;

- Levantar dados da geração de energia e do custo de usinas já existentes com este modelo de funcionamento;

- Realizar uma análise conclusiva acerca da unidade de geração real, tomada como exemplo no trabalho, Crescent Dunes, nos EUA, visando estabelecer um custo x benefício e comparando a fonte a outras disponíveis no mercado;

- Sob vários pontos de vista, integrar a usina heliotérmica ao ambiente de construção, tentando estabelecer vantagens, dificuldades, desafios, problemas e facilidades na implementação e manutenção do projeto no Brasil;

- Analisar as possibilidades de impactos ambientais decorrentes do uso da tecnologia heliotérmica conforme condições estabelecidas dentro do trabalho;

- Avaliar a viabilidade inicial da construção de uma usina no local de estudo, considerando os seguintes fatores: matriz energética brasileira atual, horários de geração da fonte solar térmica e o comportamento da curva de preços de energia no Brasil.

1.4 JUSTIFICATIVA

De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006): “O aumento da demanda energética em conjunto com a possibilidade de redução da oferta de combustíveis convencionais e a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente estão impulsionando a comunidade científica a pesquisar e desenvolver fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ambiental”. Dentre os modelos mais difundidos estão,

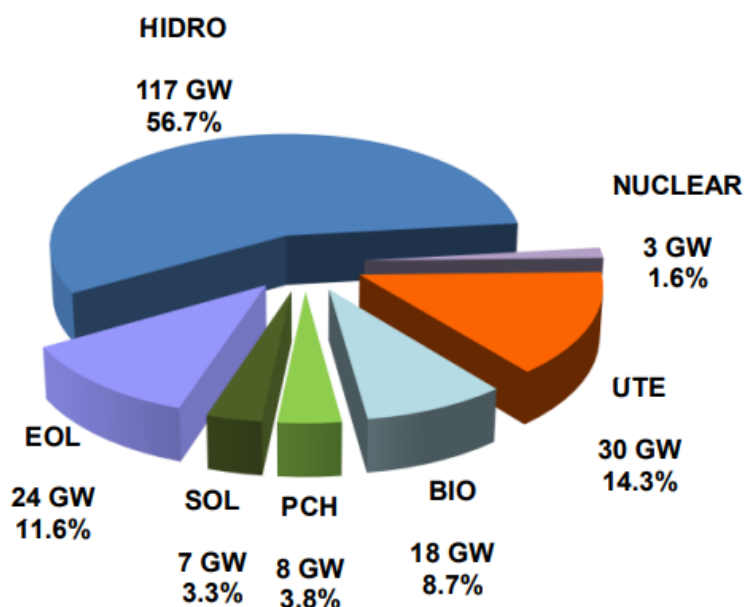
principalmente, aqueles que, de alguma forma, aproveitam a energia proveniente da irradiação solar e dos ventos.

Muito se pesquisa e se sabe acerca de células fotovoltaicas, principal forma de captação de energia solar atualmente. Entretanto existem, além da fotovoltaica, outras formas de aproveitamento da irradiação do Sol, como por exemplo concentrando os raios solares de forma a aquecer água até que se obtenha um vapor com pressão para mover uma turbina, utilizando o princípio das usinas térmicas, são as chamadas Usinas Heliotérmicas.

O modelo de usina em questão é inovador e pouco explorado atualmente. Segundo Kresch (2017), nesse mesmo ano existiam apenas 10 usinas em funcionamento no mundo com capacidade de geração superior a 121 MW (usinas de grande porte).

Como exposto pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2015, foi projetado que, até dezembro de 2024, a participação da energia solar como fonte de geração na capacidade instalada será de 3,3%, ao passo que as usinas térmicas que utilizam biocombustíveis, combustíveis fósseis ou energia nuclear como fonte de geração somam 24,6%, como mostra a Figura 2 (UTE, NUCLEAR e BIO).

Figura 2 - Participação das fontes de geração na capacidade instalada em dezembro/2024.



Fonte: EPE (2015)

Segundo o Global Solar Atlas, a Irradiação Global Horizontal (GHI - *Global Horizontal Irradiation*), entendida como a energia média que o Sol irradia horizontalmente no solo em uma área e período de tempo determinados, varia entre 4,15 a 6,12 kWh/m² por dia no território brasileiro. De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2017, elaborado pelo MME e pela EPE, o consumo per capita durante um ano, na região com a maior incidência solar (nordeste), foi de 1404 kWh.

Levando em conta o GHI de 6 kWh/m² ao dia, tem-se que um único metro quadrado absorve 2190 kWh de energia do Sol em um ano, ou seja, 600 kWh a mais do que um indivíduo consome em média na região nordeste do Brasil.

Segundo os dados da *SolarReserve* (2015), somente metade da área em uma estação fotovoltaica seria suficiente para gerar a mesma quantidade de energia no modelo apresentado no trabalho. Além disso, com sal derretido, existe a possibilidade de armazenamento da energia, diferentemente da maior parte das matrizes energéticas comerciais, isso proporcionaria ao produtor poder resguardar a energia em um tempo de até 10 horas depois da geração da mesma (*SolarReserve*, 2015), o que significa, poder usar a energia armazenada durante a maior parte da noite ou ainda vender energia para a rede em horário de pico. Um último fato importante a se ressaltar é que de acordo com a Inside Climate News, a planta de Crescent Dunes, EUA, pode gerar energia a R\$ 0,20/kWh, o que significa um custo abaixo da maioria das fontes atualmente utilizadas no Brasil.

Enfim, esta forma de geração se apresenta como algo muito promissor para um futuro próximo, devido a fatores como o seu baixo custo de geração, a capacidade de armazenamento de energia e o baixo impacto ambiental. Por isso a importância de verificar a viabilidade da implementação do projeto heliotérmico frente a outras tecnologias para uma possível produção de energia em escala comercial no Brasil.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho foi embasado em análises bibliográficas, visando estimar a viabilidade da implantação de uma usina heliotérmica através da análise de dados disponibilizados de usinas já existentes e estudos bibliográficos.

Para obter os resultados do trabalho, buscou-se dados de estruturas já existentes através de relatórios oficiais, assim como de dados meteorológicos da região na qual seria implantada a usina. Os estudos realizaram-se com a obtenção de variáveis, como a incidência solar e a capacidade de geração de energia elétrica, para escolher uma boa região de implantação no Brasil e analisar sua viabilidade.

A equipe trabalhou com dados obtidos de estudos anteriores, como os conduzidos pelo IBICT (2013), e de relatórios de usinas já implantadas, quando disponíveis. Também foram usados dados de órgãos oficiais que tratam de meteorologia, como o Instituto Nacional de Meteorologia, vinculado ao Ministério da Agricultura e Pecuária. Foi feita também uma análise financeira não-otimista para a operação da usina, focando então o trabalho em viabilidade geral e não apenas no seu funcionamento técnico.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1: apresenta de maneira concisa os assuntos que serão abordados no projeto, bem como sua relevância, objetivos geral e específicos do trabalho, problemas e premissas e os procedimentos metodológicos que serão utilizados.

Capítulo 2: contextualiza acerca da utilização da energia elétrica provinda de fontes tipo “Torre Solar”. Apresenta o panorama mundial e o panorama brasileiro de matrizes energéticas, além de tendências a curto, médio e longo prazo dessa matriz.

Capítulo 3: apresenta o funcionamento da fonte energética em estudo, seus princípios e todos os conceitos que são abrangidos na sua construção e manutenção.

Capítulo 4: descreve a unidade de geração Crescent Dunes, da Solar Reserve nos EUA, tais como condições do local, detalhes técnicos da usina, construção e contratação, dificuldades e desafios.

Capítulo 5: analisa a viabilidade da fonte heliotérmica atualmente, custos de construção, operação e manutenção, análise ambiental e por último breves pinceladas em torno da viabilidade no contexto brasileiro.

Capítulo 6: avalia uma possível construção da usina na Bahia, análise do ponto de vista ambiental, climático, demográfico e de infraestrutura. Uma breve análise do contexto econômico dentro do país também fora feito.

Capítulo 7: Expõe conclusões finais acerca da viabilidade da implantação da usina nas circunstâncias avaliadas.

2 A FONTE HELIOTÉRMICA

Energia heliotérmica ou energia solar térmica concentrada, ou ainda energia termossolar, conhecida pela sigla em inglês CSP (*Concentrating Solar Power*), é uma fonte de energia que utiliza do princípio térmico de geração, ou seja, aquece água até que se consiga um vapor em alta pressão para mover o gerador elétrico, mas com o calor concentrado provindo dos raios solares. Atualmente existem quatro tipos mais conhecidos dessa geração, onde alternam-se apenas os arranjos dos espelhos que concentram a luz solar, são eles: o coletor cilíndrico-parabólico, o linear Fresnel, as torres solares e os discos parabólicos. As quatro topologias têm o mesmo objetivo: concentrar os raios solares em uma mesma direção, podendo ser um único ponto (disco parabólico e torre solar) ou ainda em uma mesma linha (calha cilíndrico-parabólica e coletor linear Fresnel)

A Tabela 1 mostra as principais diferenças entre os arranjos:

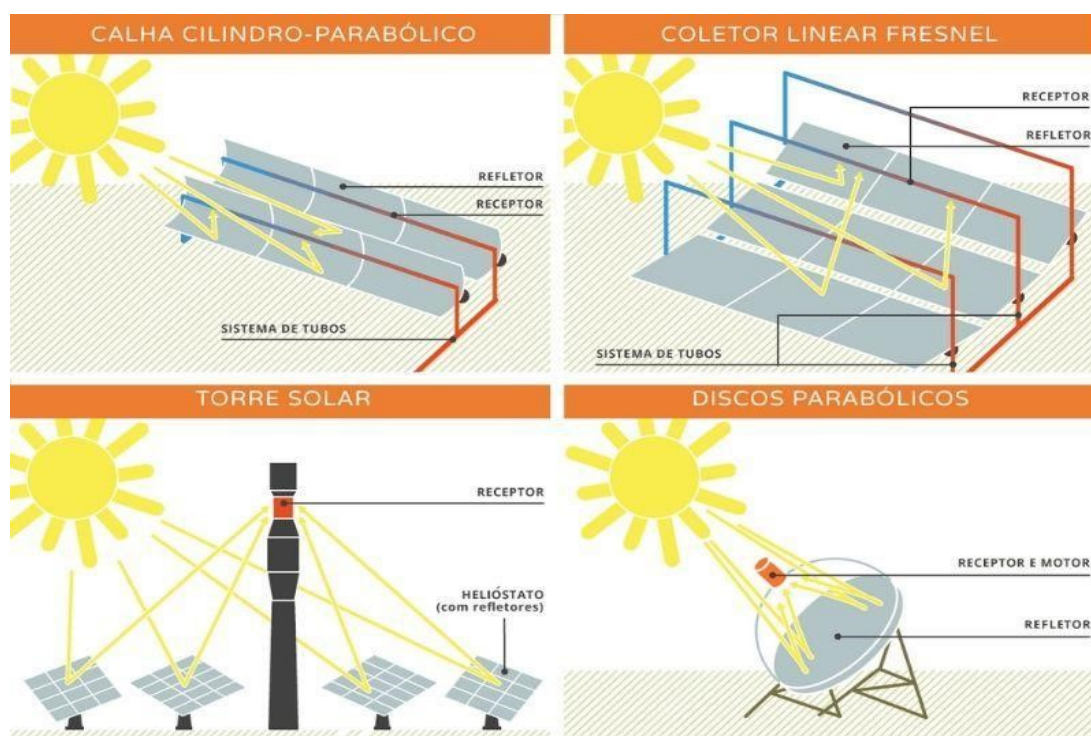
Tabela 1 - Tipos de Energia Heliotérmica e suas propriedades.

Nome	Foco	Arranjo dos Espelhos	Grau de Concentração	Temperatura de operação no foco
Calha Cilíndrico-Parabólico	Linha	Fileiras de espelhos Linear-parabólicos	≈ 100 vezes	≈ 450 °C
Coletor Linear Fresnel	Linha	Fileiras de espelhos linear-planos	≈ 100 vezes	≈ 450 °C
Disco Parabólico	Ponto	Unidades de discos de espelhos parabólicos	≥ 1.000 vezes	700 a 1.000 °C
Torre Solar	Ponto	Campo de helióstatos de espelhos planos	≥ 1.000 vezes	700 a 1.000 °C

Fonte: IBICT (2015).

Para se entender melhor o funcionamento dos diferentes arranjos quanto à concentração dos raios solares, a Figura 3 ilustra os quatro tipos de captação da energia térmica:

Figura 3 - Tipos de Energia Heliotérmica.



Fonte: IBICT (2013)

Em cada modelo utilizado, existe um receptor desta energia térmica, onde passa um líquido que será aquecido até a temperatura desejada.

2.1 PRESSUPOSTOS HISTÓRICOS

Os primeiros relatos do aproveitamento desse tipo de energia, segundo Malagueta (2012), remetem ao século II a.C., quando Arquimedes teria queimado uma frota inimiga por meio da concentração de raios solares. Apesar de não comprovado o fato, são muitas as referências deixadas ao longo da história.

No século XIX, uma máquina a vapor movida a energia solar foi criada por Augusto Mouchot. “Uma de suas máquinas, uma impressora movida à energia solar foi apresentada em uma exposição internacional em Paris em 1882 e imprimia 500 cópias por hora, mas foi considerada pelo governo francês cara demais para ser fabricada em larga escala.” (MALAGUETA, 2012)

“O primeiro registro de construção de uma usina de energia solar concentrada é de 1917 no Egito, com capacidade de 0,5 MW, cuja qual ainda

não era utilizada na geração de energia elétrica, mas para um fim específico. Em 1968 foi instalada em Gênova (Itália) uma segunda usina com capacidade de 1 MW” (ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2010)

Na década de 1970, com os dois primeiros choques do petróleo, por conta da escassez e conseqüente alta nos preços do combustível, o mundo foi estimulado a buscar energia proveniente de outras fontes, entre as quais as renováveis, que apareceram com grande principalmente estimuladas por governos e ONG's no intuito de atenuar a emissão de gases do “efeito estufa”, foi quando emplacaram os atuais modelos de coletores de radiação solar.

Segundo Malagueta (2012), a primeira planta solar comercial foi instalada no Novo México em 1979 pelo laboratório Sandia (*Sandia National Laboratory*), composta por coletores cilindro-parabólicos que faziam com que nos pontos focais das calhas atingissem temperaturas de até 500°C e foi utilizada inicialmente para calor de processos industriais.

Uma planta de geração de energia com maior capacidade só apareceu em 1981, sendo construída no sul da Califórnia e denominada “*Solar One*”. Com capacidade de 10 MW de potência, o projeto utilizou 1.818 heliostatos de 40 m² de área de superfície refletiva cada, com uma área total de 72.650 m², como relata a Universidade da Califórnia (2009).

2.2 A FONTE HELIOTÉRMICA NO MUNDO

Segundo o site da *SolarPACES*, devido a grandes programas governamentais de incentivo a essas fontes e pesquisas realizadas, atualmente, cerca de 65% das plantas de geração de energia heliotérmica em funcionamento no mundo estão localizadas nos EUA e Espanha. Além desses dois países, o site informa que usinas grandes, com uma potência instalada de 10 MW ou mais, estão localizadas principalmente no chamado cinto solar, região da Terra que se estende entre 40° de latitude ao norte e ao sul do Equador, em países como: África do Sul, Argélia, Austrália, Chile, Egito, Emirados Árabes Unidos, Índia, Marrocos.

Em diversos países - África do Sul, Arábia Saudita, Argélia, Argentina, Chile, China, Egito, Estados Unidos, França, Israel, Itália, Kuwait, México,

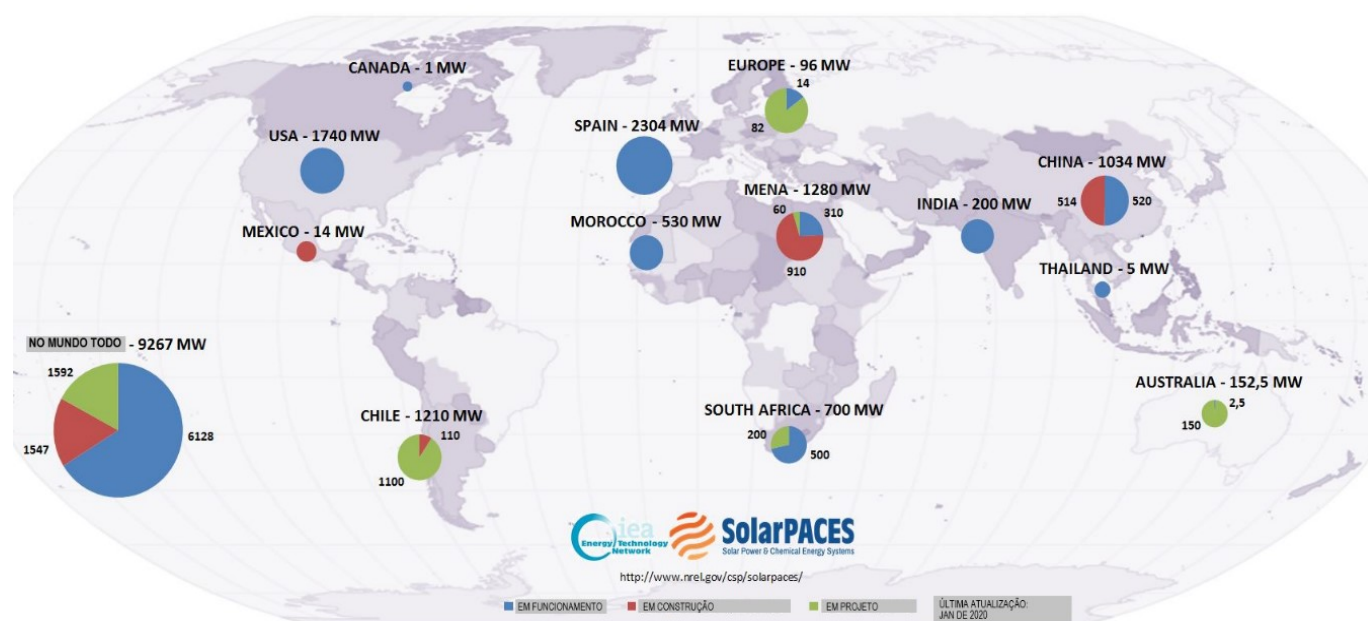
Marrocos e Tunísia - usinas heliotérmicas se encontram em construção atualmente ou em fase de planejamento.

Segundo dados da *SolarPACES*, de 2020, a maioria das plantas em operação e as que estão sendo construídas são as do princípio de Calha Cilindro-Parabólica, por outro lado o princípio que mais cresce atualmente é o da Torre Solar, o que ressalta o seu desenvolvimento em termos de eficiência energética, nos últimos anos.

Atualmente, segundo dados do site *SolarPACES* de 2020, já são mais de 100 grandes usinas com este conceito em operação, construção ou planejamento no mundo. São 2304 MW de potência instalada na Espanha, 1740 MW nos EUA e o restante espalhado pelo mundo todo, completando 9267 MW entre os projetos em funcionamento, em construção e em desenvolvimento, como mostra a figura 4:

Figura 4 - Usinas Heliotérmicas ao redor do mundo.

Fonte: SolarPACES (2020)



Alguns dos projetos em construção iniciarão sua operação já em 2021, aumentando a energia gerada por estas fontes. Vale ressaltar também que, nos últimos anos, a China tem investido com força em pesquisas nesta área,

onde já se projeta, segundo a SolarPACES que até 2023 ela ultrapassará os EUA em potência instalada.

2.3 A FONTE HELIOTÉRMICA NO BRASIL

Apesar de a fonte ainda não ser amplamente utilizada no Brasil, isso não significa que não existem estudos ou até mesmo projetos e incentivos para instalação de plantas solares.

Atualmente, no Brasil, existe 1 projeto em fase de implantação, sendo construído pela Chesf (Companhia Hidrelétrica do São Francisco) em Petrolina, Pernambuco, segundo o site da empresa. Além disso, o nível de pesquisa científica no país já está pronto para absorver tecnologias de países desenvolvidos nesta área, como Estados Unidos, Espanha e Alemanha. “Em 2013, o Ministério de Ciência e Tecnologia lançou o primeiro edital de pesquisa (via Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq) em Heliotermia, visto que hoje existem pesquisas em curso em diversas universidades no Distrito Federal, Santa Catarina, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraíba, Pernambuco e Ceará. Outro edital, aberto pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Cooperação Alemã, também selecionou três projetos de pesquisa em cooperação entre institutos brasileiros e alemães.” (IBICT)

Conforme o documento da Chesf (2019), a planta situada no município de Petrolina, será construída para testar o equipamento e mensurar o seu custo para a produção de energia. Ao contrário dos equipamentos solares já usados no país, parte da planta poderá armazenar energia para ser utilizada inclusive a noite. Petrolina não foi escolhida por acaso, mas porque o semiárido nordestino é ainda mais propício ao desenvolvimento do projeto, e a cidade detém um dos maiores níveis de irradiação solar do país.

"À medida que os recursos hídricos estão exíguos e deficitários, e até por uma questão de hidrologia estão com pouca água, se faz necessário que rapidamente a gente encontre outra alternativa para armazenamento de blocos de energia. A energia heliotérmica é uma grande esperança para a produção energética do futuro, uma das mais atraentes", disse Benedito Parente, assessor de Planejamento Estratégico da Chesf em entrevista em 2016.

Segundo dados da Chesf (2017), a unidade de Petrolina começou a ser construída no dia 21 de Junho de 2017, com uma primeira etapa do projeto avaliada em R\$ 54,3 milhões. Esta fase ainda está em construção e é relativa apenas à energia fotovoltaica, com previsão de término no ano de 2021. Contará com uma planta básica de 2,5 MW de potência instalada e uma planta tecnológica para pesquisas com 0,5 MW. A terceira planta, se

A companhia também afirma que estão inseridas no projeto a terceira e quarta plantas: serão construídas duas usinas heliotérmicas. A planta CSP principal será no modelo de calha cilíndrico-parabólica com uma potência instalada de 1 MW, cuja qual será construída em parceria com o Cepel (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) com um orçamento estimado de R\$ 56 milhões. A sua execução tem início previsto para 2020 com período de implementação de 36 meses. Além dessa tecnologia principal dentro da planta básica, será construída também uma segunda usina utilizando a tecnologia da torre solar, com armazenamento de energia durante 7 horas e orçamento previsto de R\$ 45,8 milhões. Também esta obra se iniciará em 2020, com período de implementação de 48 meses. “Sob a ótica científica e de inovação, a usina terá vários elementos que estão no estado da arte, sendo passíveis de investigação para otimização e ajuste de parâmetros de funcionamento.” é o que afirma a companhia em seu documento Centro de Referência em Energia Solar de Petrolina, de 2017. Vale ressaltar também que “economicamente, é inegável a relevância do projeto, que, entre algumas contribuições, formará e estruturará uma cadeia de fornecimento local, melhorando as condições da região.” (Chesf, 2017). Ao todo, serão três etapas no projeto, totalizando um investimento de mais de R\$ 152 milhões.

“Estamos iniciando projeto para construir uma usina fotovoltaica centralizada de alto rendimento e nosso objetivo vai além, Petrolina terá um Centro de Referência em Energia Solar, voltado ao desenvolvimento do conhecimento científico e tecnológico, que estamos denominando de Cresp, esse é o propósito final do projeto” afirma o presidente da Chesf, Sinval Gama, em 2017.

2.4 TENDÊNCIAS A CURTO, MÉDIO E LONGO PRAZO

Segundo a *SolarPACES*, até janeiro de 2020 havia 9.267 MW de potência instalada em todo o mundo com o princípio de concentração de energia térmica do Sol, sendo 6.128 MW em regime de operação, 1.547 MW em construção e 1.592 MW em desenvolvimento.

Somente no ano de 2018, como relata Bahar, foram adicionados 600 MW de capacidade de CSP, a maior expansão anual desde 2013, que representou um valor cinco vezes maior que em 2017. Os protagonistas desse crescimento foram Marrocos e China, que colocaram 200 MW de geração cada.

De 2011 até 2017, a geração de eletricidade a partir de CSP aumentou em média 25% ao ano, e em 2018, aumentou cerca de 8%, apesar dos valores brutos representarem um recorde. Segundo a IEA, a expansão anual da capacidade precisa atingir 2 GW por ano até 2025 e 8 GW até 2030.

Ainda de acordo com a IEA, há a previsão de crescimento de 4,3 GW entre 2018 e 2023. “A China lidera com 1,9 GW, seguida por 1 GW de projetos que recebem apoio multilateral do banco de desenvolvimento em Marrocos e na África do Sul, 1 GW no Oriente Médio e 300 MW na Austrália e no Chile ” (IEA, 2019).

Apesar de a Espanha e EUA, respectivamente, serem os dois maiores produtores de energia heliotérmica no mundo, não é esperado que comissionem muitos projetos durante o período até 2030, de modo que a China ultrapassará a Espanha em capacidade instalada em 2023.

“Resultados recentes de leilões indicam um potencial significativo de redução de custos, mas riscos tecnológicos, acesso restrito a financiamento, prazos de entrega longos e projetos de mercado que não valorizam o armazenamento continuam a desafiar a implantação do CSP ” (IEA, 2019).

Há uma espera de que o crescimento de fontes de CSP venha principalmente de países emergentes, onde as maiores plantas e com mais horas de armazenamento deverão entrar em operação.

A *SolarPACES*, no seu documento *Solar Thermal Electricity - Global Outlook 2016* enxerga três diferentes cenários de mercado para a evolução das Heliotérmicas. O cenário de referência é o mais conservador e se baseia nas projeções da IEA de 2014, no *World Energy Outlook*. Este cenário leva em consideração poucas ou nenhuma mudança em políticas e medidas já

existentes, também inclui pressupostos como a continuação da reforma do mercado da eletricidade e do gás, a liberalização do comércio transfronteiriço de energia e políticas recentes destinadas a combater a poluição, enfim, considera que tudo continuará.

O segundo cenário é o moderado, que leva em consideração todas as medidas políticas para apoiar a energia renovável em andamento e planejadas em todo o mundo. Assume também que as metas estabelecidas por muitos países tanto para energias renováveis quanto para energia solar concentrada podem ser implementados com sucesso. Além disso, pressupõe maior confiança do investidor no setor já estabelecido, ocasionado por um resultado bem sucedido da rodada mais atual de negociações de mudanças climáticas, o Acordo de Paris de 2015.

O último cenário, mais ambicioso de todos, examina quanto a fonte heliotérmica poderia crescer no melhor caso: supondo que todas as opções de políticas a favor das energias renováveis, nos moldes das recomendações da indústria, serão aprovados e a vontade política existe para realizá-los. Este cenário é projetado para mostrar o que o setor de energia solar concentrada poderia alcançar se fosse dado adequado compromisso e incentivo político.

Baseando-se nos três cenários descritos, a SolarPACES mostra um quadro com o resumo das projeções em cada cenário, promovendo um amplo olhar sobre as perspectivas para o futuro do CSP, é o que mostra a figura 5:

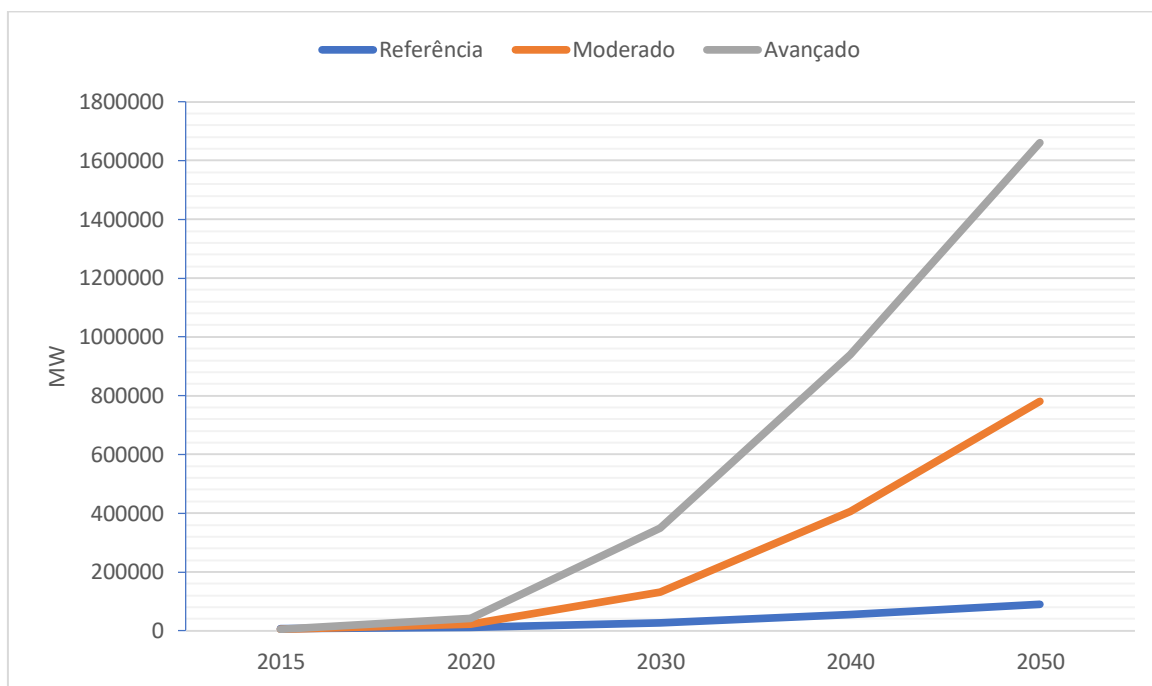
Figura 5 - Projeções de Mercado para o desenvolvimento do CSP entre 2015 e 2050.

Investimentos e Empregos		2015	2020	2030	2040	2050
Referência (Políticas Atuais)						
Instalação Anual	MW/ano	1.171	3.619	5.651	9.500	12.427
Custo	€/kW	4.287	3.485	2.814	2.688	2.674
Investimento	Bilhões US\$/ano	1,57	1,34	2,15	4,6	4,53
Empregos no Ano		18.904	16.981	29.180	62.545	70.197
Moderado Crescimento do Mercado de CSP						
Instalação Anual	MW/ano	1.075	4.834	18.876	36.652	61.654
Custo	€/kW	4.287	3.485	2.814	2.666	2.637
Investimento	Bilhões €/ano	4,61	16,85	53,13	97,71	162,61
Empregos no Ano		16.694	70.051	269.733	574.049	935.995
Crescimento Avançado do Mercado de CSP						
Instalação Anual	MW/ano	797	11.950	49.758	75.455	131.143
Custo	€/kW	4.287	3.485	2.814	2.663	2.577
Investimento	Bilhões €/ano	3,42	41,65	140,04	169,1	209,76
Empregos no Ano		12.985	169.237	712.674	1.072.328	1.443.265

Fonte: SolarPACES (2016)

Seguindo nos cenários apresentados, olhando agora sobre o ponto de vista da potência instalada, as projeções feitas pelo estudo são apresentadas no gráfico da figura 6:

Figura 6 - Potência Instalada acumulada entre 2015 e 2050.



Fonte: SolarPACES (2016)

Em um cenário avançado, com um grande contingente de energia gerada a partir de fontes heliotérmicas, 2,6 Gigatoneladas de CO₂ podem ser evitadas até 2050, contribuindo significativamente para proteger o clima do mundo, além de proporcionar uma parcela substancial da energia que será consumida no planeta.

A partir destes dados apresentado, é possível visualizar o crescimento da fonte em questão, como resultado de uma ampla conscientização acerca da importância da produção de energia sustentável, ou de temas como eficiência energética, diminuição de gases poluidores, fontes renováveis, geração distribuída, entre outros. Com este contexto de preocupação ambiental em praticamente todas as nações do mundo, é promissora a tentativa de emplacar mais uma fonte limpa com um bom custo de produção, um baixo impacto

ambiental, além de um sistema de armazenamento de energia que, em fontes como a eólica, por exemplo, tem se mostrado impossível até o momento.

3 GERAÇÃO DE ENERGIA HELIOTÉRMICA

3.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

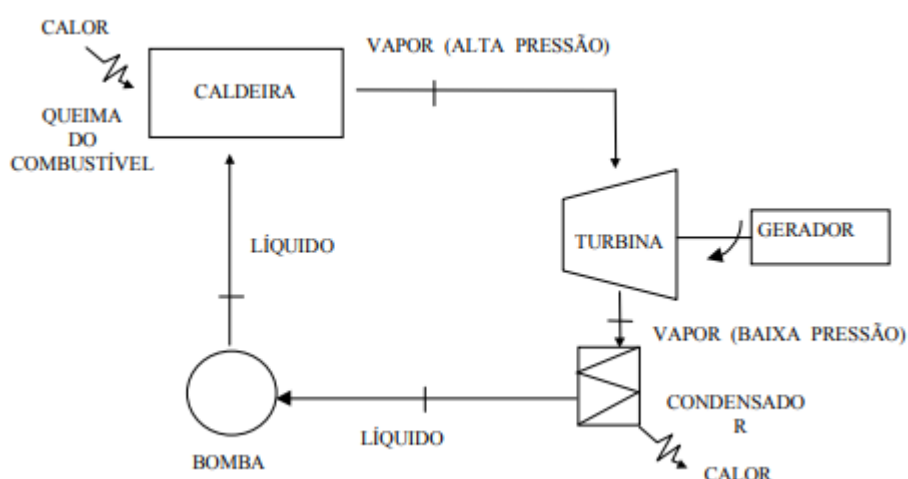
Para facilitar a compreensão sobre a usina e esclarecer os objetivos do trabalho, são abordados neste capítulo importantes aspectos relativos ao funcionamento da planta heliotérmica. Como essa é uma evolução da tecnologia térmica para geração de eletricidade, a abordagem inicia-se pelos princípios da geração termelétrica, base fundamental da usina heliotérmica.

3.1.1 A Geração Termelétrica

A geração termelétrica consiste na conversão de energia térmica em energia elétrica. Essa conversão é composta por outras transformações intermediárias: certo tipo de energia, como a química ou nuclear, se converte em energia térmica, que por sua vez é transformada em energia mecânica e, por fim, se torna energia elétrica.

Como mostra a Figura 7, uma caldeira recebe calor (proveniente da queima de combustíveis, de reação nuclear, do interior da terra ou do sol) para aquecer o fluido, geralmente água (conversão de energia química, solar ou nuclear em energia térmica). O Ministério de Minas e Energia (MME), 2019, publicou que menos de 1% calor utilizado pelas usinas termelétricas é proveniente de energia solar, enquanto mais de 60% é obtido a partir da queima de gás natural e biocombustíveis. Ao aquecer, a água gera vapor, que, a alta pressão, movimenta uma turbina acoplada a um gerador elétrico, produzindo eletricidade (conversão de energia térmica em mecânica e de mecânica em elétrica).

Figura 7 - Ciclo de geração termelétrica.

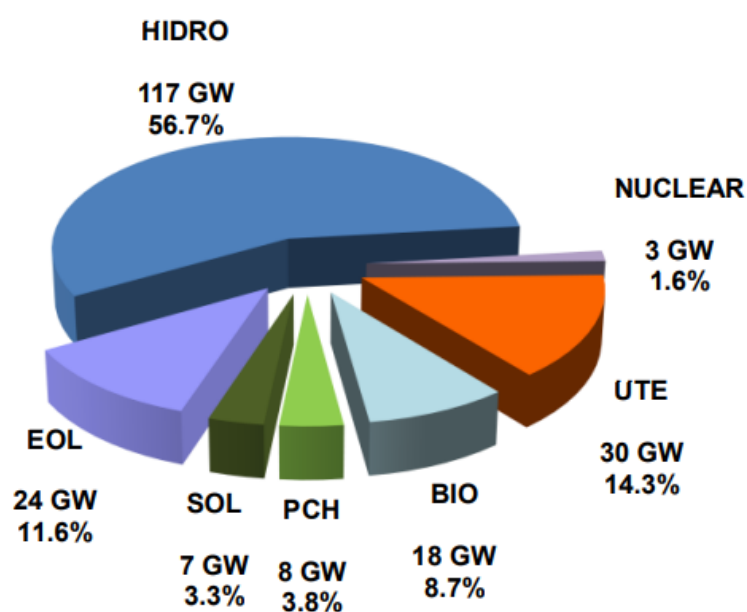


Fonte: Repositório digital da USP (2012)

3.1.2 A Geração Heliotérmica

Como exposto pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2015, foi projetado que, até dezembro de 2024, a participação da energia solar como fonte de geração na capacidade instalada será de 3,3%, ao passo que as usinas térmicas que utilizam biocombustíveis, combustíveis fósseis ou energia nuclear como fonte de geração somam 24,6%, como mostra a Figura 8 (UTE, NUCLEAR e BIO).

Figura 8 - Participação das fontes de geração na capacidade instalada em dezembro/2024.



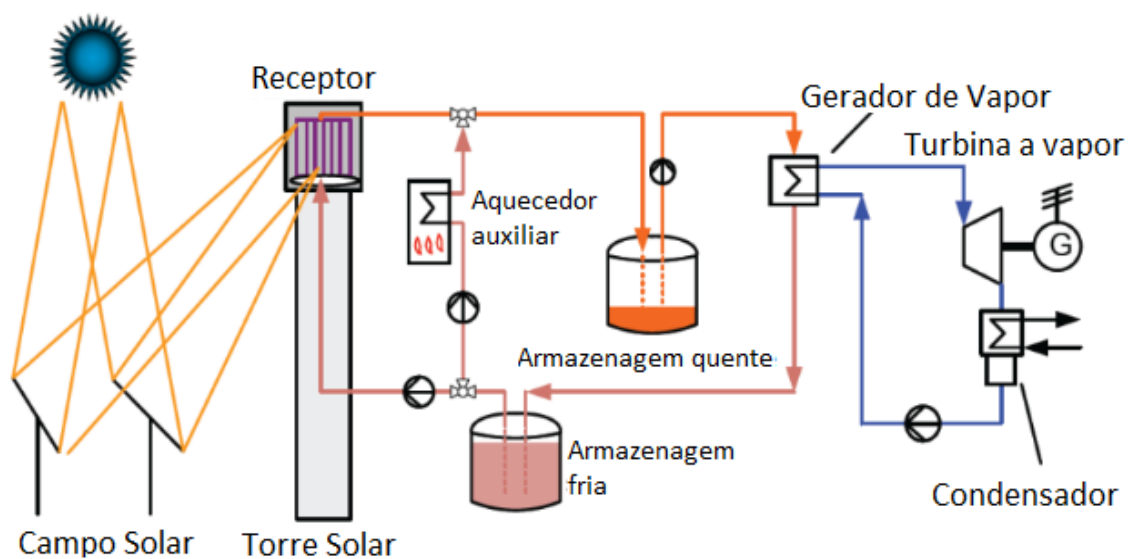
Fonte: EPE (2015)

Segundo o Global Solar Atlas, a Irradiação Global Horizontal (GHI - *Global Horizontal Irradiation*), entendida como a energia média que o Sol irradia horizontalmente no solo em uma área e período de tempo determinados, varia entre 4,15 a 6,12 kWh/m² por dia no território brasileiro. De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2017, elaborado pelo MME e pela EPE, o consumo per capita durante um ano, na região com a maior incidência solar (nordeste), foi de 1404 kWh.

Levando em conta o GHI de 6 kWh/m² ao dia, tem-se que um único metro quadrado absorve 2190 kWh de energia do Sol em um ano, ou seja, 600 kWh a mais do que um indivíduo consome em média nessa região. Tais usinas funcionam da forma descrita a seguir:

A luz do Sol é concentrada através de espelhos (heliostatos). Esses heliostatos podem ser de vários tamanhos e formas. O foco da concentração é um receptor, onde há um fluxo interno de um fluido específico (geralmente óleo), conhecido como meio de transferência de calor, proveniente de um tanque de armazenamento frio. O receptor também pode assumir várias formas, dependendo da aplicação, e as combinações entre heliostatos e receptores podem ser revistas na Figura 3. Após ser aquecido, esse meio de transferência pode ir diretamente para o bloco de potência ou ser estocado em um tanque de armazenamento quente. Esse armazenamento quente é utilizado para manter o fluido circulando para o bloco de potência mesmo quando não há incidência de luz solar para aquecimento. No bloco de potência, à semelhança com as termelétricas, o meio de transferência de calor troca calor com a água, gerando vapor, acionando a turbina e gerando energia (EPE, 2016). O ciclo pode ser visualmente conferido na Figura 9.

Figura 9 - Tecnologia CSP com receptor central.



Fonte: Chesf Torre Solar 1 (2017)

Considerando o funcionamento da usina termelétrica (Figura 4), a mudança que mais se destaca é a substituição da fonte de calor de combustão/nuclear para solar. Com essa mudança, fica claro que há um menor impacto ambiental, visto que a luz do Sol não é poluente e, considerando o tempo de vida humano, é uma fonte considerada infindável. Além disso, há a despreocupação com custos variáveis como o preço dos combustíveis, uma vez que a energia solar é de obtenção gratuita (NARUTO, 2017).

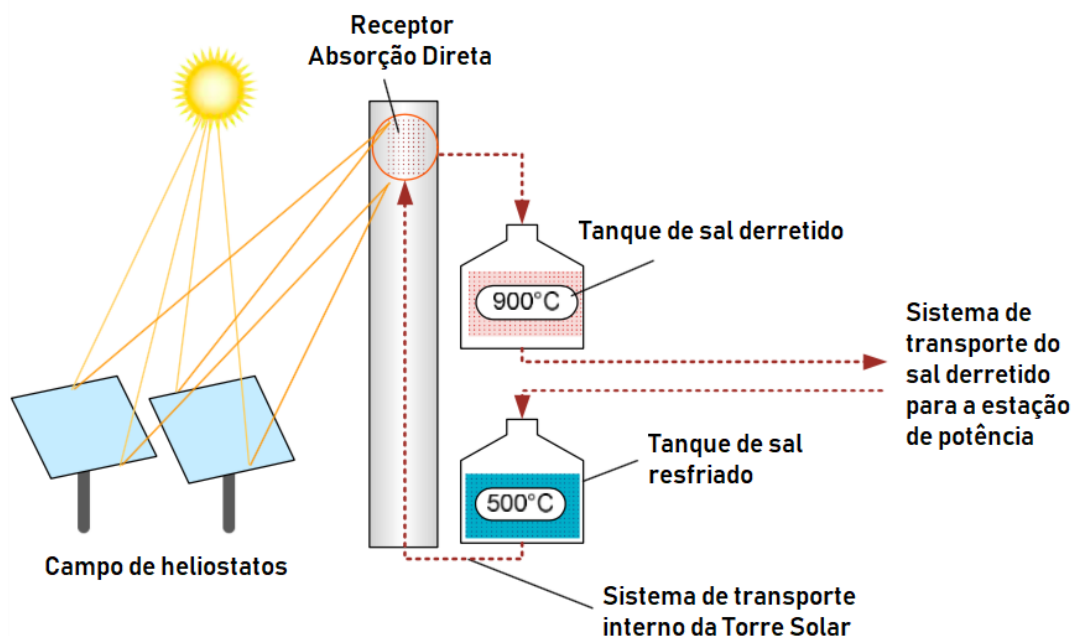
3.1.3 O Armazenamento de Energia

Como também apontado por Naruto (2017), uma das desvantagens de utilizar a energia solar é a indisponibilidade intermitente: não há controle sobre a passagem de nuvens e a noite, situações em que se perde parcial ou totalmente a radiação solar. Dessa maneira, há a necessidade de uma alternativa à obtenção de energia nesses períodos. Essa alternativa seria o sal derretido.

De acordo com o informativo publicado por Ludewig (2019), pela frente de estudo sobre CSP da Siemens, o sal derretido vem sendo utilizado como meio de transferência de calor, substituindo o óleo ou água, em usinas com torre receptora central. Com esse uso, alcançam-se duas importantes

vantagens. A primeira é que se torna possível alcançar maiores pressões e temperaturas no fluido de trabalho (vapor), acima de 180 bar e 565 °C, aumentando a potência da usina. A segunda e mais importante nesse caso é que o sal derretido também pode ser armazenado em tanques durante várias horas: “Isso cria, pela primeira vez, um meio de armazenar, de forma econômica, grandes quantidades de energia solar de forma útil e reproduzível, e de alimentar essa energia como eletricidade na rede elétrica conforme a demanda exigir.” (LUDEWIG, 2019). O esquema de aquecimento do sal é demonstrado na figura 10.

Figura 10 - Tecnologia CSP com receptor central (adaptado).



Fonte: SolarPACES (2019)

Os raios solares são focados no receptor pelos espelhos do campo de heliostatos. O sal presente no receptor é então aquecido além do seu ponto de fusão, e após fundir é escoado para o tanque de sal derretido. Esse escoamento suga o sal frio do tanque de sal resfriado, gerando um ciclo de abastecimento de sal derretido para a estação de potência.

3.2 CONCEITOS DA CONSTRUÇÃO E MANUTENÇÃO

Após compreender os princípios de funcionamento da usina, pode-se apresentar as etapas de instalação da planta heliotérmica. A seguir serão discutidos os conceitos técnicos e administrativos necessários para a construção e operação de uma usina termossolar.

3.2.1 Discussões Pré-Construção

Em qualquer projeto, antes de tudo, é necessário ter tecnologia suficiente para alcançar os resultados que se almeja. A partir disso, pode-se buscar ou construir um *know-how* para atingir os objetivos estabelecidos.

Como mostrado por Neto (2017), após acesso à tecnologia, é necessário analisar alguns fatores vitais para o sucesso da instalação e funcionamento da usina. O primeiro deles, claramente, é o local de instalação.

Alguns pontos importantes dependem do local onde será construída a usina. Será necessário avaliar a incidência solar na região (GHI), de preferência a partir de uma estação solarimétrica, garantindo que a usina irá dispor de toda a irradiação que necessita para seu funcionamento. Além disso, há também uma preocupação com a logística local: o fornecimento de insumos, equipamentos e mão de obra da região não deve ser dispendiosa ou de difícil acesso. Após a análise de irradiação solar e da viabilidade do transporte de materiais e pessoas, começa a pensar-se nas legislações.

Por se tratar de uma usina produtora de energia elétrica, é preciso buscar a legislação necessária para interligar o sistema de produção à rede, a fim de manter a operação legal. Juntamente à operação em si, deve-se também haver uma conformidade com as leis ambientais e sociais do local. Por ser uma planta com extrema concentração de calor e luminosidade, é recomendado que esteja afastada de centros urbanos e que não interfira de modo sobrepujante em nichos ecológicos, tanto em operação como durante sua construção.

Em posse das informações sobre as legislações vigentes e a viabilidade técnico-econômica do local escolhido, inicia-se a fase de projeto. Essa fase inclui a elaboração do projeto de planta, a partir do projeto conceitual e então do projeto básico. Com o projeto feito e sabendo-se a demanda da planta a ser instalada, como área total, capacidade operacional, número de

funcionários e outros, deve-se então obter a Licença Prévia e a Licença de Instalação, essas necessárias para a implantação do projeto e construção da usina. Com as licenças é possível planejar também a gestão de ativos da planta e seus pontos de eficiência energética, garantindo uma operação econômica e sustentável ao seu máximo. Ao final do planejamento, obtém-se a Licença de Operação, e então está tudo pronto para o início das obras, como descrito a seguir (NETO, 2017).

3.2.2 Construção

A construção da usina, usando como base a construção do projeto de torre solar da Chesf, inicia-se com o preparo do terreno para a instalação do campo de heliostatos. Um empenho maior deve ser empregado na terraplanagem e nivelamento do campo, pois é necessário que os heliostatos sejam precisamente controlados para focar o feixe de luz solar em um só ponto e diminuir a influência causada pelas perdas, e o terreno plano e horizontal facilita esse ajuste (FILHO, 2014). Nesse período também é feita a ferragem de fundação da planta, tanto para os blocos de geração como para as bases civis.

Concomitantemente é elaborada a cadeia de suprimentos e aquisições, ou seja, é determinada a logística de fornecimento da planta. É construído o receptor central, no caso, a torre solar. Essa será a responsável por absorver todo o reflexo gerado pelos espelhos e aquecer o meio de transferência de calor. Apesar de serem projetadas para suportar altíssimas temperaturas, tanto a torre solar como a planta inteira em si contarão com equipamentos que são mais sensíveis a altas temperaturas, além dos operários que lá trabalharão. Desse modo, é necessária também a construção de um sistema de refrigeração e ventilação, ou sistema de ar.

Para a correta operação da usina e possibilidade de operar na ausência de luz solar é vital a instalação dos tanques de armazenamento de calor, ou “tanques quentes”. Esses tanques são responsáveis por acomodar o sal fundido após ser aquecido dentro da torre solar.

Além dos elementos básicos para o funcionamento da planta já descritos, é preciso também que sejam construídas as instalações civis e elétricas, a fim de acomodar os operários, os equipamentos de controle e

demais partes do processo, bem como as utilidades que permitirão a flexibilidade na operação da usina, como o *by-pass* de armazenamento (que permitirá que o fluxo de sal se dirija diretamente ao gerador de vapor em vez de ir ao tanque quente, garantindo maior eficiência na produção) e áreas de manutenção, para que respostas a imprevistos sejam rápidas.

3.2.3 Finalização e Ajustes

A finalização da planta consiste no ajuste dos programas que controlarão os espelhos e na escala de funcionários, assim como o treinamento dos operadores e planejamento de operação que determinará toda a produção da planta.

É interessante que haja um projeto, ainda que para construção futura, de uma plataforma de pesquisa. Essa plataforma de pesquisa e desenvolvimento será útil para estudos sobre a usina e auxiliará no progresso da produção e no desenvolvimento da área, tanto para fins de *benchmarking* como para melhorias na própria planta.

3.2.4 Operação e Manutenção

A manutenção de uma usina é dividida entre as fixas e as variáveis. As fixas dizem respeito às que serão realizadas independentemente da produção da usina, como limpeza de ambiente e de equipamentos e manutenções preditivas. As variáveis são as que dependem da produção ou de eventos externos, como manutenção corretiva e preventiva.

A usina heliotérmica envolve altas temperaturas, causando bastante dilatação no meio de transporte do sal e consequentes vazamentos que deverão ser reparados. Por envolver equipamentos rotativos e altas voltagens (geradores), é normal também a atividade de lubrificação e inspeção de peças.

No entanto, os maiores custos de manutenção e operação serão com pessoal, uma vez que a confiabilidade dos equipamentos atualmente só aumenta e não há grande consumo de insumos, como combustível ou sal de reposição, por ser pouco volátil (RITTER et al., 2017).

4 ANÁLISE DA USINA DE CRESCENT DUNES, EUA

Este capítulo apresenta um estudo sobre a usina *Crescent Dunes*, localizada nos EUA. Esta usina é importante pelo simples fato de que é a primeira usina no mundo a utilizar o princípio de sal aquecido como armazenador de energia. Além disso, pode-se afirmar que se trata de uma usina relativamente grande, com um potencial esperado de gerar 500 GWh de energia por ano.

4.1 INTRODUÇÃO

Poder-se-ia questionar o fato de que existem mais fontes de energia pelo princípio CSP no modelo de Calhas Parabólicas que de Torres Solares para uma possível pesquisa na área, porém, nos últimos anos, as usinas com Torres Solares têm se mostrado mais baratas perante as de Calhas Parabólicas segundo uma pesquisa da *New Energy Update* (2015).

Segundo dados da *SolarPACES*, de 2016, em setembro de 2011, quando foi iniciada a construção da estrutura da *Crescent Dunes*, o departamento de energia dos Estados Unidos já havia garantido um empréstimo à Solar Reserve de US\$ 737 milhões para financiamento do projeto. A unidade teria uma potência instalada de 110 MW e a construção demorou quase 5 anos para sua conclusão, que aconteceu no segundo semestre de 2015, quando a usina entrou em operação.

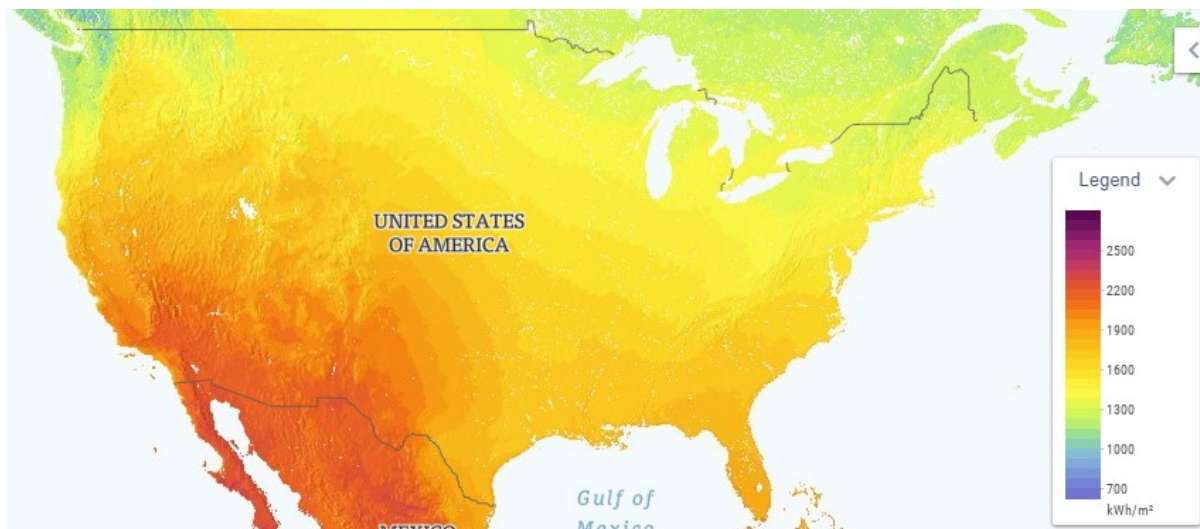
4.2 O LOCAL

De acordo com o *Global Solar Atlas*, 2020, a região em que foi estabelecida a planta heliotérmica é uma das regiões com os maiores índices de radiação solar dos EUA, além de uma média de muito poucas chuvas no local durante o ano, devido a ser uma região desértica. É sabido que as poucas chuvas, indiretamente, representam também uma menor umidade do ar, que tem como consequência uma baixa nebulosidade do local, o que por fim significa uma maior irradiância direta incidindo sobre os espelhos.

A usina fica localizada próxima a cidade de Tonopah, estado do Nevada a 310 km de Las Vegas. A Figura 11, disponibilizada pela Global Solar

Atlas (2020), mostra uma radiação muito forte no sudoeste dos EUA, local onde se encontra a usina.

Figura 11 - Média anual de irradiação solar na América do Norte.



Fonte: Global Solar Atlas (2020)

O lugar em questão é estratégico, pois fica localizado no deserto de Tule, ao sudoeste do Nevada, lugar onde além de alta irradiação solar e pouca umidade, também tem uma baixa densidade demográfica, causando pouco impacto social e ambiental.

4.3 DETALHES TÉCNICOS DA USINA

A *Crescent Dunes*, que é uma das maiores geradoras de energia heliotérmica do mundo, foi a primeira a instalar, junto à usina, tanques com sal derretido para armazenamento de energia.

O princípio utilizado para armazenar energia é manter o sal derretido a uma alta temperatura e, quando for necessário, utilizar o mesmo para o aquecimento da água que se transformará em vapor de alta pressão, movendo, dessa forma, a turbina do sistema.

Segundo informações reunidas pelo site da *SolarPaces*, de forma resumida, foram 10.347 heliostatos instalados em uma área de 1.197.148 m² e com uma torre central de cerca de 185 metros. Foi feita uma estimativa de aproveitamento da energia solar por metro quadrado, chegando-se a um dado de 2.685 kWh/m²/ano.

A geração esperada por ano era de 500.000 MWh, porém, alguns problemas com o banco de sal foram identificados na usina e até 2019, ela estava entregando apenas 40% de toda a energia contratada.

O sistema é basicamente uma usina térmica onde o calor utilizado para que o vapor gire as turbinas é proveniente do Sol. No sistema em questão, a capacidade de geração da turbina é de 110 MW, o que seria suficiente para abastecer 75.000 casas de médio padrão de consumo. Segundo estudos feitos na usina pela própria Solar Reserve, o sistema de baterias possui uma eficiência de 99% e consegue armazenar, nos seus 2 reservatórios de sal, energia durante até 10 horas.

A bateria armazena energia quando o calor é aumentado desde 288 para até 566 °C. Dessa forma, mesmo com uma temperatura não tão alta para o sal, ainda é possível produzir na água um vapor forte o suficiente para girar as turbinas do gerador.

Além de todas essas estruturas, o empreendimento ainda conta com algumas lagoas de evaporação, uma parte dedicada somente à fabricação de heliostatos, além de um escritório e uma área de assentamento. A Figura 12 mostra uma foto da usina, ilustrando características da Unidade *Crescent Dunes*, daí pode-se também ter uma noção da grandiosidade do projeto, tendo em vista a torre no centro de 185 metros em uma escala tão reduzida.

Figura 12 - Representação da Usina Crescent Dunes com algumas informações.



Fonte: SolarReserve (2015)

4.4 CONSTRUÇÃO E CONTRATAÇÃO DA ENERGIA

Segundo dados da *Solar Reserve* de 2015, o custo total de construção da usina foi de US\$ 975 milhões, ou pouco mais de R\$ 4 bilhões, onde a maior parte do dinheiro (US\$ 737 milhões) foi garantida pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos para o início do projeto.

Este custo inicial, junto a todo o dinheiro investido no empreendimento considerando a sua construção e manutenção, em 2019 já havia chegado a 5 bilhões de dólares, segundo artigo publicado na Tech Startups, de 2020.

Segundo dados da própria SolarReserve, de 2015, a energia produzida pela usina foi vendida para a NV Energy, empresa do setor público responsável por gerar, transmitir e distribuir energia no norte e no sul de Nevada, através de um contrato de 25 anos com a empresa a US\$ 0,135 / kWh, o que nos EUA representa um valor elevadíssimo frente a outras fontes. Entretanto, principalmente o fato de ser uma usina despachável por conta do armazenamento de energia, a torna viável.

Outro fator importante considerado no momento da contratação e do financiamento, é que a unidade de Crescent Dunes possui um caráter experimental dentro das heliotérmicas: projeto onde primeiro foram

incorporadas baterias de sal derretido. Por isso, mesmo tendo um alto custo de construção e manutenção, o projeto foi apoiado amplamente por órgãos do governo e financiadores privados.

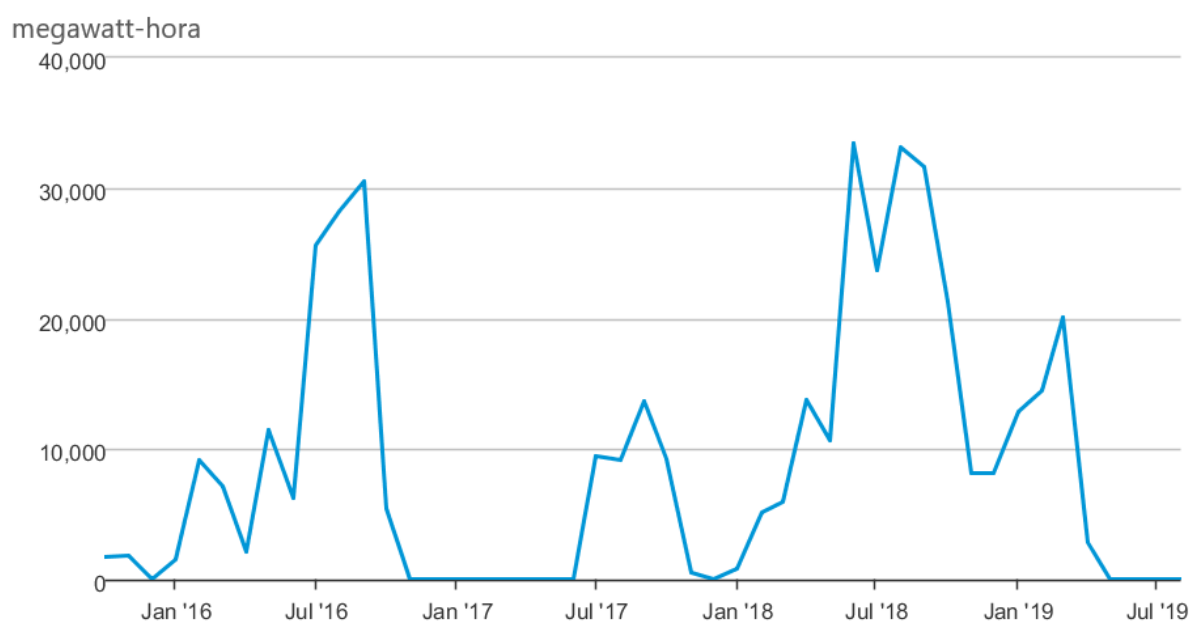
4.5 DIFICULDADES E DESAFIOS

Um vazamento de sal derretido ocorrido em outubro de 2016 acabou fechando a usina por quase 9 meses, até junho de 2017, o que causou um grave prejuízo na operação. O contrato, que havia sido firmado por 25 anos com a *NV Energy*, foi prejudicado drasticamente. Com a falta de entrega da energia total do sistema e com a mesma sendo comprada a US\$ 0,135 / kWh, a execução do contrato tornou-se inviável ao passar dos anos e em outubro de 2019 a *NV Energy* – única cliente do projeto – rescindiu o contrato alegando que o projeto “falhou em produzir”.

Além do problema do vazamento, segundo a *Tech Startups*, 2020, houve problemas de má administração dentro da *SolarReserve*, além de falta de confiança do investidor no projeto, causada principalmente pela redução no preço do Silício e favorecimento da fonte fotovoltaica, frente à solar térmica.

Todos estes problemas são confirmados com o relatório de produção da usina que está sendo mostrado na Figura 13 a seguir:

Figura 13 - Dados da geração mensal de energia na planta Crescent Dunes em MWh.



Fonte: U.S. Energy Information Administration (2019)

Em 2018, a planta do Nevada obteve seu maior ano de produção, com um total de aproximadamente 195.810 kWh produzidos. Apesar de ser um montante razoável, ele representa apenas 40% do total previsto e, desde o início de sua operação comercial, a usina produziu somente 21% do total de energia prevista para o período. No início de 2019, houve um bom resultado para o período, o que trouxe ao grupo até mesmo expectativas de cumprir o contrato neste ano, porém, no mês de abril, a fábrica foi interrompida sem quaisquer explicações plausíveis para o público em geral.

Atualmente, já não está online nem mesmo o site da empresa responsável do projeto e a mesma perdeu financiadores, além de o próprio apoio de analistas.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante de todas as situações expostas de dificuldades e até mesmo o abandono do projeto, o presente instrumento considerará os dados projetados antes do início da operação como possíveis ao projeto *Crescent Dunes* e que os dados reais de falência e produção reduzida aconteceram fortuitamente. Esta alternativa pode ser justificada pelo sucesso obtido em outras usinas do mesmo princípio de geração e que tem gerado energia até o presente momento e cumprindo os seus contratos regularmente.

Portanto, supondo o sucesso da implantação desta usina, podem-se considerar os seguintes dados esperados:

- A geração anual de 500 GWh por ano;
- O preço da energia de US\$ 0,135/kWh;
- A vigência do contrato de 25 anos;
- O custo de implementação de US\$ 975 milhões;
- Não houve problemas de geração e nem vazamento de sal.

5 VIABILIDADE DA FONTE HELIOTÉRMICA

O início do planejamento da usina dá-se a partir da necessidade de energia na região e demanda uma análise de viabilidade, tanto econômica como ambiental. O desenvolvimento de um projeto heliotérmico se assemelha ao de qualquer outro empreendimento do setor elétrico, gerando potenciais impactos econômicos, sociais e ambientais na região onde é instalado, portanto é necessária uma atenção voltada para ponderar estratégias que facilitem o licenciamento, construção e instalação da planta (PROJETO DKT1, 2017).

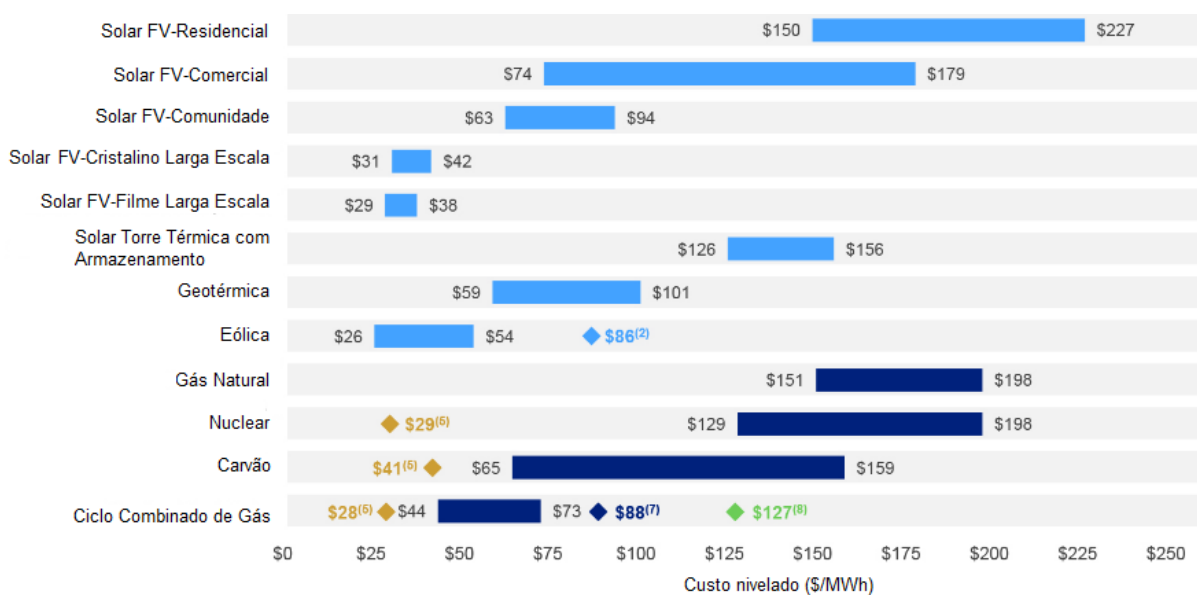
Uma vez que os âmbitos sociais e ambientais podem estar diretamente ligados, há o risco de que as estratégias facilitadoras acabem sendo muito complexas por terem que abordar ambos os aspectos simultaneamente. Para que a análise dessas estratégias seja clara e objetiva, este capítulo versará individualmente sobre os aspectos econômico e ambiental da usina.

5.1 ANÁLISE ECONÔMICA

O custo das fontes de energia normalmente é estipulado pelo LCOE (*Levelized Cost Of Energy*), ou seja, significa custo nivelado de energia. Segundo a consultoria Simpleray (2019), o LCOE é um termo que descreve o custo da energia produzida durante um período de tempo, normalmente a vida útil garantida do sistema. Este termo leva em consideração duas variáveis principais: o custo total para o sistema (deve incluir custos de financiamento e deduzir incentivos recebidos, como créditos e depreciação); e quanta energia será produzida durante o período de cálculo do LCOE (normalmente é adotado um período de 25 anos).

A Figura 14 mostra o custo aproximado das tecnologias nos EUA em dólares por MegaWatt hora (US\$/MWh) em uma estimativa no ano de 2020. O método de cálculo utilizado foi o LCOE:

Figura 14 - Custo Nivelado de Energia estimado para os EUA em 2020.



Fonte: LAZARD (2020). Adaptado.

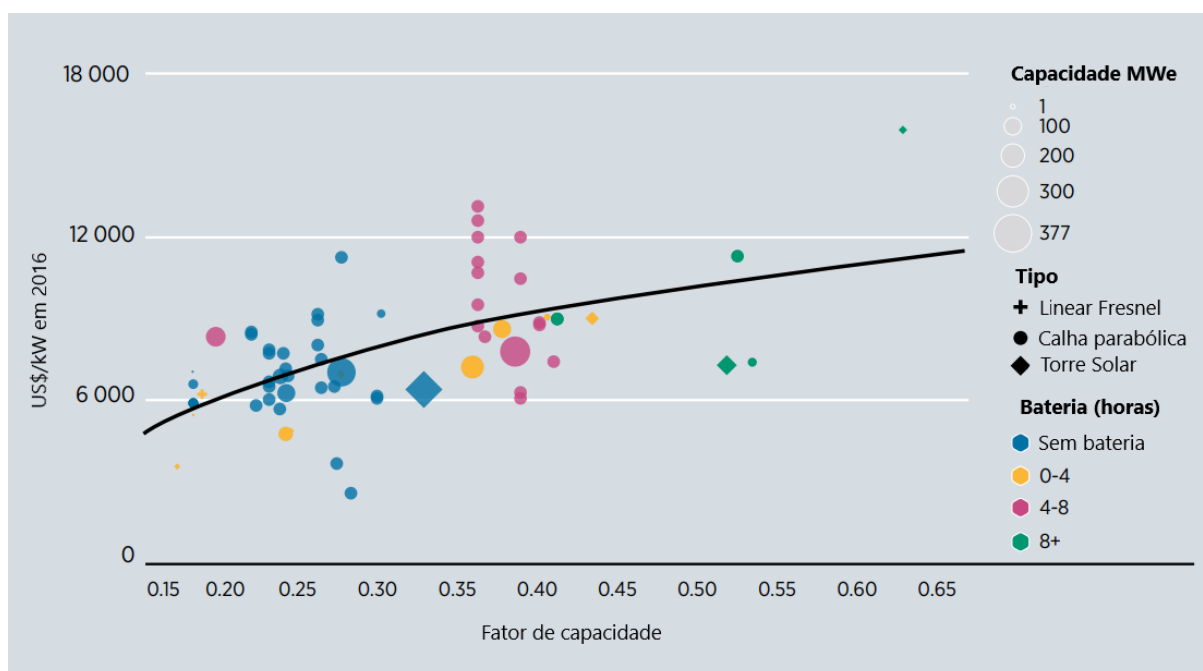
Como pode-se observar, o cenário parece desfavorável para a energia heliotérmica, pois ela encontra-se como uma das fontes mais caras dentre as renováveis (Solar fotovoltaica em larga escala, geotérmica e eólica), isso sem contar com o fato de que a unidade Crescent Dunes, estudada no capítulo 4 do trabalho, não atingiu o nível de produção planejado. No entanto, a energia termossolar já mostra um preço competitivo, sendo mais barata, em média, que a energia nuclear, térmica a gás natural e fotovoltaica em baixa escala. Para que não se cessem aí as evidências da viabilidade da tecnologia, pode-se ir adiante e lançar um olhar sobre a unidade Cerro Dominador, localizada no deserto do Atacama, no Chile, que promete gerar eletricidade a um preço de US\$ 114 / MWh, com uma vida útil entre 30 e 40 anos, segundo dados da revista Exame, de 2018. Isso colocaria a fonte em custos próximos ao das usinas geotérmicas e se aproximando da fotovoltaica e eólica.

Além dos números em si, é importante esclarecer também que os custos apresentados já integram o armazenamento térmico, diferentemente das demais fontes que consideram apenas o custo de produção e não de armazenamento. O que se conclui da observância do gráfico é que ainda é uma tecnologia bastante cara, porém, dependendo das características e necessidades do projeto, pode-se tornar absolutamente viável e barata.

5.1.1 Custos de Construção

Um estudo realizado pela IRENA (Internacional Renewable Energy Agency), de 2018, denominado Renewable Power Generation Costs in 2017 (Custos de Geração de Energia Renovável em 2017) mostra que, dependendo das características do projeto, os valores em US\$ por kW de potência diferenciam-se. O fator de capacidade de uma usina, é a proporção entre a produção efetiva de energia em um determinado período de tempo e a capacidade total do sistema neste mesmo período. O estudo em questão demonstra que usinas sem capacidade de armazenamento de energia possuem um custo menor, porém um fator de capacidade também menor, dado que a usina se torna não-despachável. Por outro lado, as heliotérmicas com armazenamento de energia detêm um custo maior e um fator de capacidade também maior, é o que mostra a figura 15:

Figura 15 - LCOE das diferentes tecnologias, tamanhos e armazenamentos em CSP.



Fonte: IRENA (2018).

Segundo o relatório, para sistemas de calhas parabólicas (tecnologia mais empregada no momento do relatório) os custos totais de plantas instaladas possuem um intervalo entre US\$ 2.550 e US\$ 11.265/kW para

sistemas sem armazenamento. Adicionando 4 a 8 horas de armazenamento, entretanto, pode-se ver este intervalo cair aumentar para US\$ 6.050 a US\$ 13.150/kW. E, observando a Figura 15, é possível dizer que sem armazenamento as usinas possuem em média um fator de capacidade próximo a 0,25 e com armazenamento entre 4 a 8 horas, o fator de capacidade está em 0,37. Apesar de um crescimento de mercado um tanto irregular, como é comentado no capítulo 2, uma tendência para projetos com maior nível de armazenamento tem se concretizado, isso é o que mostram os dados da SolarPACES, de 2020.

Segundo a IRENA, mesmo que a fonte solar térmica não tenha se desenvolvido tanto quanto outras renováveis de destaque no mercado em 2017, existem oportunidades significativas para redução de custos conforme a implantação cresce. A fonte pode representar uma importante contribuição para um futuro de baixo carbono. É estimado que importantes melhorias tecnológicas, tais como nos refletores, coletores, redução de custos de instalação e engenharia e redução em componentes específicos são esperados para o CSP.

As taxas de aprendizagem representam a redução de custo com cada duplicação da capacidade cumulativa e para o CSP foram estimadas entre 10 e 12%, é o que mostra Neji, em 2008. Entretanto, alguns trabalhos mais recentes já sugerem uma taxa de aprendizagem acima de 20% (PITZ-PAAL, 2017) e “se os resultados do leilão para Dubai e Austrália do Sul forem levados em consideração, para o período de 2010-2022, a taxa de aprendizagem pode chegar a 30%.” (IRENA, 2018).

5.1.2 Custos de Operação e Manutenção

A IRENA (2018) aponta que “os custos relacionados a operação e manutenção dos projetos CSP representam um componente significativo do LCOE. ”. Eles vêm decrescendo ao longo do tempo e já estão bem mais baixos que nos primeiros projetos espanhóis, que foram estimados em US\$ 0,04/kWh (Cohen, 1999), sendo as despesas para reposição de receptores e espelhos um dos maiores custos, isso por conta da quebra dos vidros. No contexto atual, com a melhoria das tecnologias desses equipamentos, este custo já não possui

uma parcela significativa da manutenção, sobressaindo sobre ele, por exemplo, o custo de água para a lavagem dos espelhos. “A análise de custo IRENA CSP usada neste relatório assume um custo médio de Operação e Manutenção, incluído o seguro, na faixa de US\$ 0,02 a US\$ 0,03 /kWh para Projetos de Calha Parabólica e de US\$ 0,03 a US\$ 0,04 /kWh para Torre Solar.” (IRENA, 2018).

5.1.3 Tendência de Queda do LCOE

De acordo com um relatório comissionado pela ARENA (*Australian Renewable Energy Agency*), a Agência Australiana de Energia Renovável (2018), pode-se concluir que o custo de instalação de uma planta heliotérmica começa a ser competitivo quando o armazenamento instalado é suficiente para 6 horas ou mais. Além disso, o relatório diz que a tecnologia heliotérmica com torre solar tem aumentado o número de unidades em uma média de 40% por ano, e que embora esse crescimento dependa muito das configurações políticas de cada país e tenha caído lentamente, ainda é permanente a tendência de que os custos continuem diminuindo.

O relatório da IRENA (2018) cita que “uma tendência de queda no LCOE começou em 2012. De fato, durante 2013 e 2014, as estimativas do LCOE foram, em média, cerca de um quinto mais baixas do que as de período 2009-2012.” O principal fator que influenciou esta queda foi o aumento da irradiância direta normal (IDN) dos locais onde as plantas foram instaladas, principalmente por conta da estagnação da Espanha na corrida do CSP e a construção e planejamento de novos empreendimentos em países com uma maior IDN. Portanto, o IRENA destaca que, os efeitos da aprendizagem e as melhorias tecnológicas ainda não foram, portanto, o principal impulsionador das reduções de custos. Um outro ponto importante nessa melhoria foi o aumento do fator de capacidade das usinas principalmente por maiores capacidades de armazenamento e despacho das mesmas. A figura 16 mostra a evolução do LCOE da fonte heliotérmica com o passar dos anos:

Figura 16 - LCOE da tecnologia CSP entre 2010 e 2022.



Fonte: IRENA (2018).

No gráfico é possível observar-se uma previsão de grande queda do LCOE para até 2022, chegando aos patamares, dentro de projetos na Austrália e Emirados Árabes Unidos, de aproximadamente 0,07 US\$/kWh. Na comparação entre as fontes da figura 14, com este preço de energia projetado para 2022, a heliotérmica ainda ficaria atrás da eólica e das plantas fotovoltaicas de larga escala, empatando com a fonte geotérmica e ficando à frente do gás natural, das nucleares e as de carvão, posicionando-se bem no mercado global.

5.2 ANÁLISE AMBIENTAL

O MMA (Ministério do Meio Ambiente) dispõe de um instrumento de gestão, chamado Avaliação Ambiental Estratégica, que visa avaliar a qualidade do meio ambiente e dos impactos ambientais da tecnologia, garantindo a

segurança relativa ao tratamento correto de questões ambientais (PROJETO DKTI, 2017).

Esse instrumento possibilita que o impacto ambiental seja mensurado, para assim garantir o devido licenciamento ambiental e um desenvolvimento sustentável do negócio. No caso da usina heliotérmica, deve-se mapear as áreas mais sensíveis do ponto de vista socioambiental, possibilitando reverter quadros de declínio socioeconômico, como por exemplo as áreas em processo de desertificação, cenário mutuamente benéfico para a instalação de uma usina heliotérmica.

Considerando o levantamento feito pelo Projeto DKTI, os quesitos mais importantes em relação às heliotérmicas são:

- altas temperaturas, pois como é um sistema que utiliza foco pontual, pode-se criar maiores problemas em relação ao microclima e à presença de animais voadores na região do foco;
- requerimento de área desmatada para instalação do campo;
- possível uso de combustão de combustíveis fósseis como complemento e/ou *backup*;
- reconformação topográfica: aterros e cortes de terreno para garantir o nivelamento do campo, que podem gerar impactos ambientais;
- disponibilidade de água para resfriamento e manutenção;
- armazenamento deve ser feito com sais fundidos, que por suas características químicas podem gerar risco à saúde ocupacional da planta, mas que representam bem menos impacto ao ambiente em caso de vazamento do que óleos térmicos e combustíveis fósseis.

Analisando os impactos apontados, o de maior expressão se dá pela alteração da paisagem necessária para a instalação do campo solar, pois esta alteração acarreta em uma completa mudança do ambiente local. O desmatamento e terraplanagem suprimem a flora local, alterando também o nicho de animais silvestres e comunidades que dependem dessas espécies, assim como a possibilidade de haver patrimônios arqueológicos e paleontológicos na região. Há também alteração das drenagens naturais do

solo com a mudança de volumes de terra para nivelamento, podendo causar seca prolongada em cursos d'água intermitentes, impactando profundamente a biodiversidade local. Além disso, há também poluição por presença humana, gerada pelo uso de materiais de construção, combustíveis e materiais de uso geral (PROJETO DKTI, 2017).

Impactos menos comuns, mas igualmente significativos são: possibilidade de colisão de aves com o campo de espelhos; queimadura de animais que passem pelo foco de concentração dos raios solares e possível uso de herbicidas para manter a vegetação no campo de espelhos sob controle.

Por fim, pode-se inferir que a fonte heliotérmica é de baixo impacto ambiental, desde que atendidas as estratégias que garantam uma operação e manutenção sustentável.

5.3 VIABILIDADE NO CONTEXTO BRASILEIRO

Um aspecto bastante interessante a ser observado, dadas as proporções do sistema elétrico brasileiro, é justamente a possibilidade de armazenamento de energia.

Atualmente, no Brasil, o que se pode observar no espectro energético, em linhas gerais, é que as fontes que estão em maior crescimento no mercado, a saber, a eólica e a fotovoltaica respectivamente (ABEEólica, 2020) produzem pouca energia no horário de pico do sistema que varia entre 17 e 21 horas. Isso porque a energia fotovoltaica tem suas melhores horas de geração entre 10 da manhã e 04 da tarde, horário em que o Sol incide perpendicularmente na superfície terrestre. A usina eólica, por outro lado, tem seus picos de geração durante a madrugada quando a demanda é menor, com exceção do estado do Ceará, como informam os dados do *site* do Governo do Estado do Ceará (2019).

Em resumo, o que é observado no cenário interno brasileiro é uma matriz com alguns pontos a se destacar:

- Geração Hidráulica: não varia organicamente nas horas do dia, mas varia conforme o volume de chuvas, o que a torna viável,

mas com uma confiabilidade em um nível que exige muita diversificação da matriz energética;

- Geração Térmica: a mais confiável de todas, é utilizada quando se tem uma necessidade de geração maior que aquela suprida pelas outras fontes, em picos de carga, mas que ainda conta com um preço elevado. É plenamente despachável;
- Geração Eólica: fonte que já tem se tornado uma das mais viáveis economicamente. Apesar deste fato, conta com um pico de geração, na maioria dos casos, durante a madrugada (Governo do Estado do Ceará, 2019), fazendo com que seja necessário ainda investimentos para suprir as demandas do horário de pico do consumo brasileiro com a diversificação da matriz;
- Geração Fotovoltaica: têm favorecido fortemente a geração distribuída no Brasil com um custo bastante acessível, é atualmente a melhor opção para micro e minigeração, segundo a ABSOLAR, 2020. Porém, assim como a Eólica, seu pico de produção não corresponde ao pico de carga do SIN.

A conclusão que se quer chegar, quanto à viabilidade de uma usina heliotérmica com armazenamento de energia em sal derretido é que: a usina geraria energia, como a fotovoltaica, em um horário de consumo razoável, mas que o armazenamento de cerca de 10 horas, faria com que a usina estivesse pronta para ser utilizada durante todo o horário de ponta, entre 17 e 21 horas.

Analisando estes dois aspectos combinados e considerando que o preço da energia no horário de pico é maior, pode-se considerar pontos de vantagem para o CSP. Além disso, a maior parte dos investimentos de infraestrutura em um sistema tão vasto como o SIN (Sistema Interligado Nacional) são pensados para suprir a demanda nos horários de pico. O principal objetivo do ONS (Operador Nacional do Sistema), segundo Benedito (2010), é o suprimento do seu mercado de energia, levando-se em conta: continuidade, qualidade e economia.

6 ESTUDO NO CONTEXTO BRASILEIRO

Não obstante ter-se estudado a fonte heliotérmica, suas tendências, custos, operação, funcionamento, etc. faz-se necessário agora um estudo com enfoque no sistema de energia brasileiro, como se enquadra esta fonte, quais aspectos convergem e quais divergem para a obtenção do objetivo de operar uma usina heliotérmica com um custo de operação e preço de venda dentro da média do país.

O projeto deve levar em conta as condições do local de implementação da usina, prós e contras, facilidades e dificuldades, etc.

6.1 CIDADE DE JUAZEIRO, BAHIA, BRASIL

Estado da região nordeste do Brasil em que se fez o estudo, com uma área de 564.760,427 km² (IBGE, 2019) e uma população de 14.930.634 de habitantes (IBGE, 2020), a Bahia torna-se interessante por concentrar uma boa irradiação solar, principalmente no seu sertão, com o clima semiárido de poucas chuvas e longos períodos de seca.

6.1.1 O Local

Como discutido em tópicos anteriores, para a instalação de uma usina precisa-se analisar a disponibilidade de terras para construção, a irradiação solar local e a logística de instalação e operação. Conforme essas condições, deve-se buscar um local onde, além da alta Irradiância Global Horizontal, exista também baixa densidade demográfica, pois terrenos serão mais baratos e menos impactos ocorrerão na comunidade local.

Tendo em vista estes desafios, estudou-se a viabilidade de instalação da usina na região norte do estado da Bahia, devido a quatro fatores principais: a alta incidência solar, o baixo nível de precipitação, a baixa densidade demográfica e a proximidade a complexos do rio São Francisco.

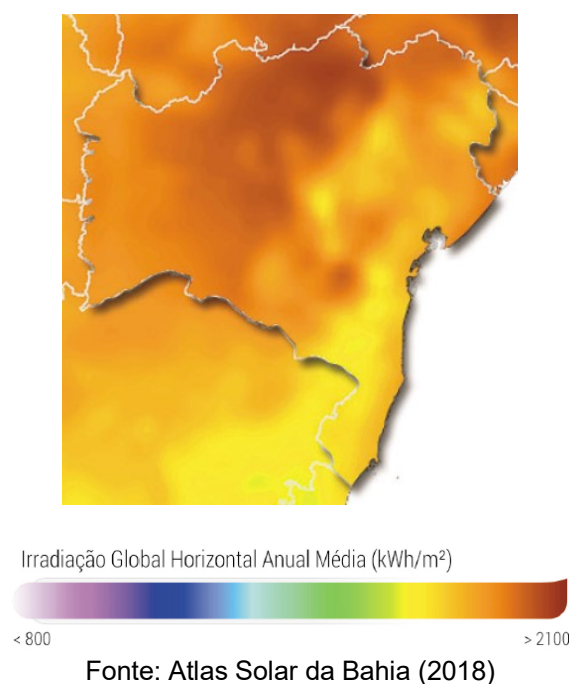
Segundo o Global Solar Atlas, a IGH (Irradiância Global Horizontal) na microrregião de Juazeiro, na Bahia, chega a 6,5 kWh/m² por dia, sendo um dos locais de maior insolação do território brasileiro. Além disso, possui pouca nebulosidade, aumentando a disponibilidade de produção durante o dia. Já o

Censo 2010, elaborado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), informa que a densidade demográfica na região não passa de dez habitantes por km², significando que há muita terra inabitada.

6.1.2 Irradiação Solar e Precipitação

O mapa da figura 17 mostra exatamente a região de Juazeiro, situada ao extremo Norte do estado, na divisa com Pernambuco, como uma região de grande Irradiação Solar, em termos da média de Irradiação Global Horizontal tomada em um ano.

Figura 17 - Mapa da Bahia com dados da Irradiação Solar.

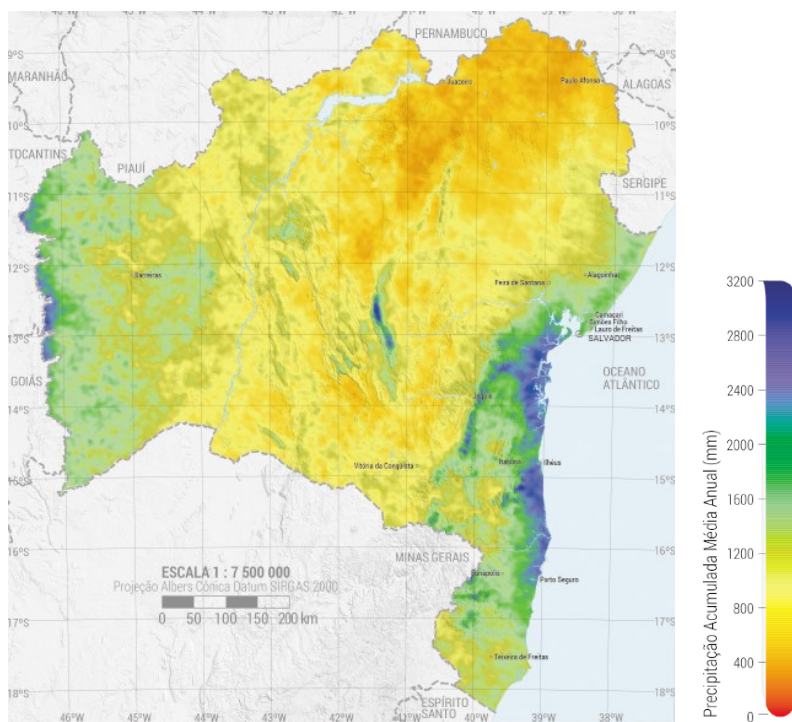


Chegando a níveis próximos à 2100 kWh/m² ao ano, o que equivale a aproximadamente 5753,42 Wh/m² ao dia, sendo bem acima da média diária nacional de 4450,10 Wh/m² (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2017). Com os índices chegando nestes níveis será possível até 30% a mais de produção energética.

Além da alta Irradiação Solar apresentada na figura 17, o Atlas Solar da Bahia também concede dados sobre os níveis de precipitação no local, que são bem baixos, principalmente na região de Juazeiro, como é possível

observar na figura 18, chegando nos níveis de aproximadamente 300 milímetros anuais de chuva.

Figura 18 - Precipitação média anual da Bahia.



Fonte: Atlas Solar da Bahia (2018)

Esse baixo índice pluviométrico é importante também para que o local possua uma boa média de Irradiação Solar, pelo motivo de que terá a irradiação incidindo diretamente do sol e não de forma indireta ou difusa. O índice de chuvas, além de estar relacionado à umidade do local, também influencia na baixa nebulosidade do local, dando razão à alta irradiação encontrada nesta área.

6.1.3 Análise Demográfica e de Logística

Um ponto importante a ser observado é que, geralmente, locais com baixa densidade demográfica e altas temperaturas são isolados, afetando negativamente sobre a logística necessária para o funcionamento de uma usina de energia. Torna-se difícil o transporte de equipamentos, compra de insumos e contratação e deslocamento de mão de obra.

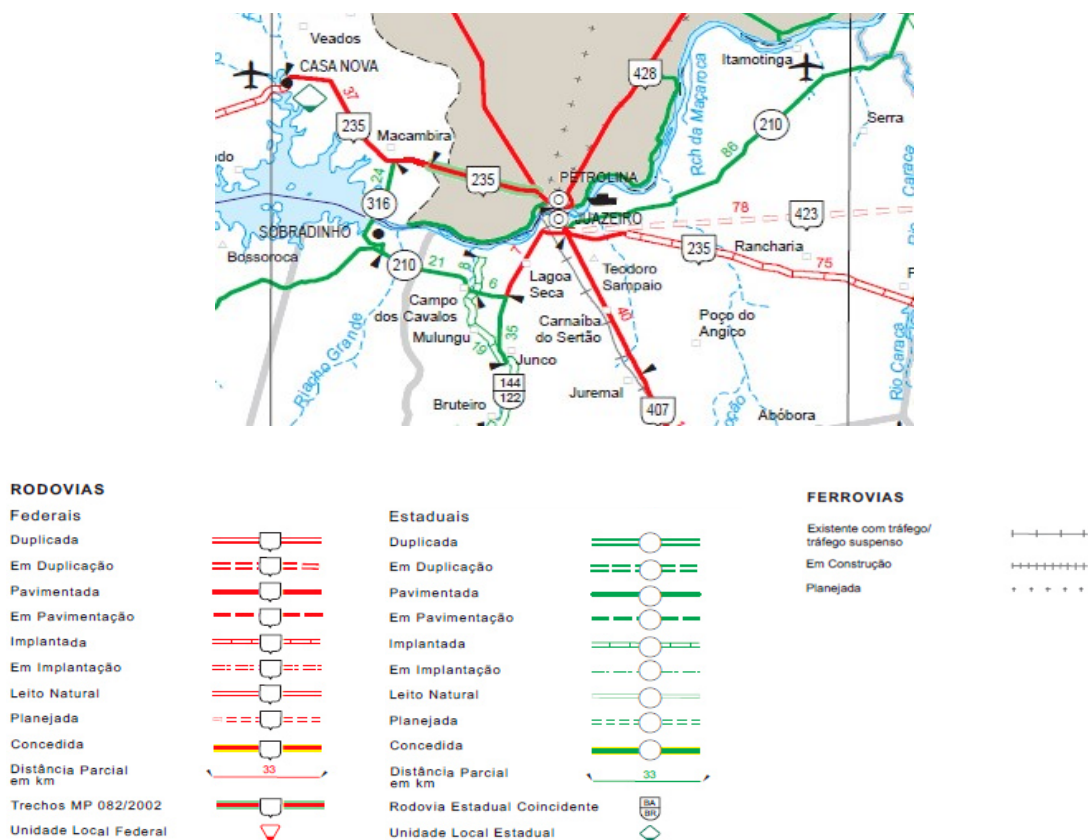
Com relação à logística, é possível utilizar vias de escoamento previamente construídas para abastecer a usina, devido à proximidade de complexos de produção do rio São Francisco, como a represa de Sobradinho e as cooperativas hortifrúti do vale do São Francisco.

Outro aspecto importante analisado é a possibilidade de nesse local haver uma área de proteção ambiental como unidades de conservação e reservas indígenas. Também este aspecto foi observado e em nenhum local do município de Juazeiro existe legislação ambiental estadual ou nacional para estes fins.

A região tem um alto potencial para fornecimento de mão de obra especializada e desenvolvimento de soluções e tecnologias, pois encontra-se próximo de excelentes polos educacionais, como Salvador, Recife e Campina Grande, além de auxílio profissional da própria Chesf.

Uma análise rodoviária do local também se faz importante, devido à alta demanda de transporte de equipamentos, materiais e mão de obra até o local. Consultando o mapa rodoviário da Bahia, destacam-se algumas rodovias federais e estaduais passando próximas a Juazeiro. A rodovia 235 e a 407 são as federais que cruzam a cidade, a 210, 144 e 316 são as estaduais que passam próximas da cidade, além de uma ferrovia que chega até Juazeiro (BAHIA TURISMO, 2013).

Figura 19 - Mapa Rodoviário da microrregião de Juazeiro, Bahia.



Fonte: Bahia Turismo (2013)

6.1.4 Análise do Sistema Elétrico

Por fim, foi feita uma análise sobre a questão energética no local, para uma transmissão eficaz da energia. Segundo o mapa “Áreas de Intersecção entre Mapas Solar e Eólico” do Atlas Solar da Bahia de 2018, existem no total nove linhas de transmissão entre médias e altas tensões chegando na cidade de Juazeiro, são elas: três de 500 kV, duas de 230 kV e quatro de 69 kV; tudo isso além de uma linha de 500 kV em planejamento/licitação. Além disso, são mais de 10 subestações entre aquelas de distribuição e de transmissão. Dessa forma será possível, com um investimento razoável comparativamente a outros locais, conectar uma usina dessa região no SIN (Sistema Interligado Nacional).

Vale ressaltar que, devido às diversas possibilidades de conexão com as linhas de transmissão e também às diversas subestações conectadas na

região, é possível escolher a tensão de saída da fonte heliotérmica, sendo esta uma vantagem técnica do projeto.

6.2 ASPECTOS FINANCEIROS BRASILEIROS

Para ter sucesso, o projeto no Brasil precisa ser favorecido não só pelas questões ambientais, mas também pelas questões financeiras e jurídicas brasileiras. Desse modo, é importante que se obtenha, junto ao governo ou à iniciativa privada, financiamentos e investimentos que possam arcar com os custos iniciais de construção e operação.

Com o intuito de fomentar o desenvolvimento de empresas e infraestrutura, alguns bancos fornecem financiamento para empresas brasileiras, como por exemplo o BNDES (Banco Nacional do Desenvolvimento), que possui planos de investimento a partir de R\$ 10 milhões, tornando-se uma opção viável de financiamento (BNDES, 2020).

Por outro lado, o governo federal, através da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), possui um Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica que investe em projetos de geração de energia renovável. Em 2020, o aporte financeiro do programa foi aprovado em R\$ 3,321 bilhões, dos quais R\$ 500 milhões são destinados exclusivamente à energia solar. Além disso, o Brasil possui inúmeras empreiteiras do setor energético, que podem se unir para desenvolver esse novo projeto de usina heliotérmica (ANEEL, 2020).

Concomitante ao aspecto financeiro, existem grandes polos de estudo de energia no Brasil, que formam vários profissionais capacitados para trabalhar tanto no projeto quanto na operação da usina, facilitando o suprimento da demanda de mão de obra.

Sendo assim, infere-se que é viável angariar recursos no Brasil, facilitando o investimento do projeto, sem contar com parcerias que podem ser feitas com entidades estrangeiras. Além disso, no aspecto jurídico, a legislação brasileira vem facilitando a implantação de projetos de fontes alternativas.

7 CONCLUSÃO

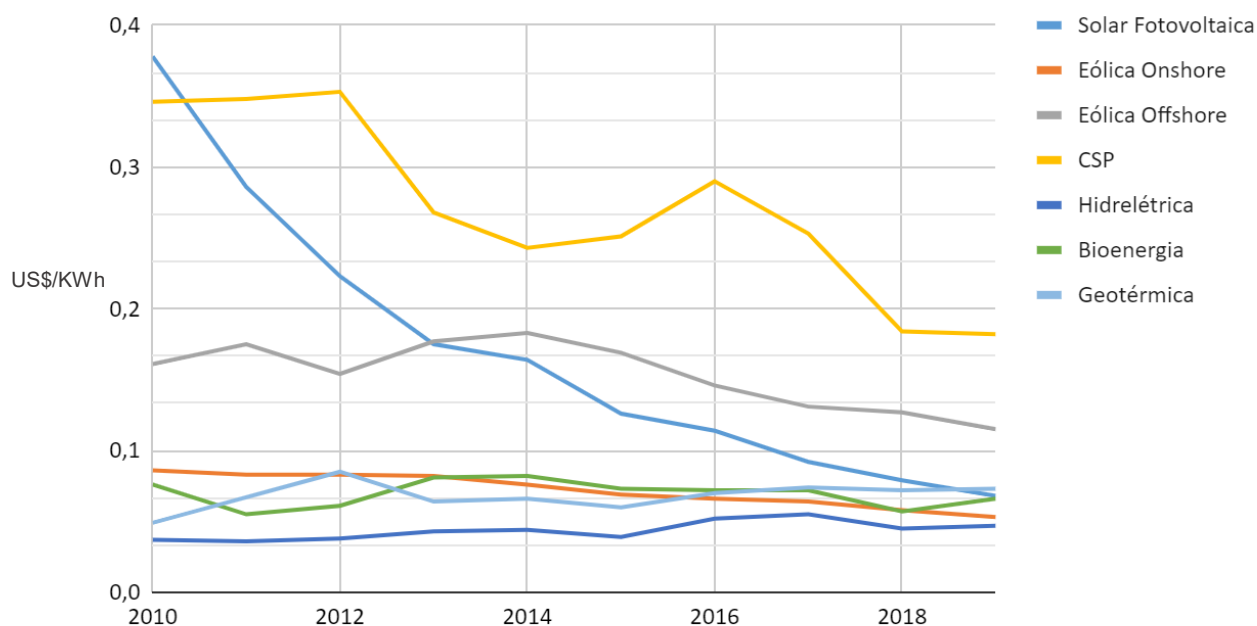
A fonte heliotérmica é relativamente recente no universo da matriz energética global e, exatamente por conta disso, pode-se dizer que a mesma se encontra em um processo razoável de desenvolvimento tecnológico e até mesmo econômico. Um fato que evidencia isso, é a própria quantidade de sistemas heliotérmicos em operação no mundo que, segundo a *SolarPACES*, não passa de 10 GW de potência instalada, frente a 578 GW da solar fotovoltaica, por exemplo (IRENA, 2020). É fato que, quanto mais investimentos em determinada fonte de energia, maior será a evolução da sua eficiência, do custo, da construção, da manutenção, entre outros fatores.

Portanto, de uma maneira geral, seguindo os dados de mercado da heliotérmica e comparando-a com outras fontes já bem difundidas no mundo, é possível afirmar que esta ainda é uma fonte incipiente e que, principalmente por esta causa, possui um custo elevado e não tem se mostrado atrativa para os investidores do ramo.

Olhando deste lado do universo heliotérmico, a impressão é que devem cessar as pesquisas, esquecer a fonte e buscar novas alternativas para a geração, até mesmo pelo fracasso, por exemplo, da unidade de *Crescent Dunes*, dos EUA. E o que se tem visto nos últimos anos é, realmente, a diminuição do número de unidades em construção e planejamento, causados principalmente pela desaceleração na Espanha e EUA, que são ainda os maiores produtores de energia por fonte solar térmica do mundo. Porém, em países como China, Austrália, Chile, Marrocos e Emirados Árabes Unidos (*SolarPACES*, 2020) uma verdadeira “primavera do CSP” tem se consolidado, não tanto pelo grande número de empreendimentos, mas principalmente pelo baixo preço da energia calculado pelo LCOE. O gráfico da Figura 16 mostra a Austrália e Emirados Árabes Unidos chegando em preços de aproximadamente US\$ 0,70 /kWh, um patamar muito bom e ampliado ainda pelo armazenamento de energia e por ser uma fonte renovável. Portanto, levando-se em conta os dois empreendimentos acima citados, já é possível concluir que a tecnologia, mesmo que ainda não explorada em grande escala, representa um grande potencial no universo energético devido ao seu baixo LCOE.

No período entre 2010 e 2019, a redução do LCOE das heliotérmicas foi de aproximadamente 53%, mostrando-se uma economia bem atrativa. Segundo dados da IRENA, de 2019, no período entre 2010 até 2019, a fonte termossolar, entre as renováveis, foi a que mais reduziu o LCOE, excetuando-se a solar fotovoltaica, conforme a figura 20:

Figura 20 - LCOE das Fontes Renováveis entre 2010 e 2019.



Fonte: IRENA (2020).

Este fato, além de mostrar o grande potencial da fonte, reforça a consideração de que ela é ainda incipiente, pois a curva de LCOE das tecnologias tende a ter uma grande queda no início das pesquisas e desenvolvimento e, com o passar dos anos, estabilizar-se, é o que pode ser observado nos casos da Bioenergia, Geotérmica, Hidrelétrica e Eólica Onshore, todas estas mais amplamente utilizadas que o CSP.

A fonte em questão não é uma tecnologia para que qualquer país, em qualquer lugar ou em quaisquer condições adote. Ao contrário de uma fonte térmica a carvão, por exemplo, que pode ser instalada sem muita dificuldade em qualquer local, a heliotérmica necessita de condições bem específicas para que funcione de acordo com o esperado e, não só isso, mas para que seja realmente lucrativa. O primeiro ponto a ser levado em consideração é a condição climática do local, deve ser um local árido, com poucas chuvas e, principalmente, com uma alta irradiação solar. Em segundo lugar, faz-se

importante boas condições rodoviárias para transporte de equipamentos e funcionários. Também faz-se importante ter mão de obra qualificada para o projeto, ou seja, é preferível que seja construída perto de centros urbanos de médio ou grande porte. Outro aspecto a ser considerado é a transmissão da energia, que pode ser um fator determinante na linha tênue entre a viabilidade e inviabilidade do empreendimento. Uma linha de transmissão de alta tensão próxima da matriz é essencial. Por último, mas não menos importante, o local precisa de uma fonte de água próxima, pois o gasto com água é um dos maiores relativamente à operação e manutenção da usina, servindo principalmente na lavagem dos espelhos.

O conjunto destes fatores aliados é de extrema importância para a implementação da usina e a sua viabilidade. Caso contrário, somente raras exceções é que serão economicamente viáveis.

Conforme verificado ao longo do trabalho, o Brasil possui condições favoráveis de implementação desta usina, sejam as boas condições climáticas oferecidas, ou, principalmente, as questões estratégicas.

O Sistema Interligado Nacional está chegando em uma saturação, de modo que, se não houvesse a crise econômica iniciada em 2011 e intensificada em 2015 e 2020, era projetado por alguns especialistas um colapso do sistema. Atualmente, porém, mesmo com um sistema deste porte e com uma boa relação entre geração e consumo, o país avança com extrema morosidade rumo a uma energia barata. Um dos principais aspectos do problema, foi a tomada de péssimas decisões estratégicas feitas pelo poder executivo em anos precedentes. A via tomada de intensificação de subsídios concedidos a sistemas nada eficientes energeticamente e a preferência por usinas térmicas caras para despacho em detrimentos de outras, fez com que a energia no país se tornasse uma das mais caras do mundo.

O preço da energia atualmente praticado no Brasil, vem essencialmente do Custo Marginal de Operação (CMO) das usinas instaladas no SIN porém, quando uma usina cara é ativada para suprir a demanda em algum pico horário (normalmente usinas térmicas por serem mais facilmente despacháveis) o CMO do sistema inteiro é calculado segundo o preço do próximo MWh a ser produzido pelo sistema. Ou seja, o preço praticado será o da última usina que entrou em operação para atender a demanda. Como o

CMO das térmicas tem um valor alto e estas são as fontes que estão preparadas para serem acionadas em um eventual aumento na potência instantânea do SIN, o preço sobe com facilidade, basta um período de seca, como é costume nos invernos brasileiros para os preços subirem a patamares de R\$ 400/MWh no mercado livre e sofrerem reajustes anuais para cima no ambiente regulado. Além desse problema, atualmente existe também um alto custo de combustível para manter as usinas térmicas prontas para serem utilizadas no momento exato de uma variação positiva da demanda energética do SIN.

Em um ambiente assim, o CSP atuaria no ponto fraco do sistema brasileiro: a demanda energética em horários de pico. Com uma capacidade de armazenamento de energia de pelo menos 7 horas, seria possível atravessar o horário de ponta do sistema, contribuindo eficazmente para manter desligadas usinas térmicas com um CMO alto, além de contribuir na geração durante o período de luz solar, que tem uma demanda também razoável de energia. Uma aplicação em larga escala da tecnologia, em regiões diferentes, traria maior confiabilidade da fonte, tendo em vista as diferentes condições de chuva e Sol em cada região.

Essa não seria a solução definitiva do país, dado que não é uma usina plenamente despachável, porém teria um potencial para representar uma grande melhora do sistema, com a redução e desoneração dos preços da energia.

REFERÊNCIAS

1. ANEEL, 2015. **Projeto estratégico: “Desenvolvimento da tecnologia nacional de geração heliotérmica de energia elétrica”**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, 2015.
2. ANEEL. **Valores das cotas do Proinfa para 2020 são aprovados**. 2020. Disponível em: < <http://bit.ly/2M4jeTQ> > Acesso em 12 nov. 2020.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEÓLICA). **Eólica: energia para um futuro inovador**. 2020. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/energia-eolica-o-setor/>> Acesso em: 03 nov. 2020.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Infográfico Absolar**. 2020. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html>> Acesso em: 03 nov. 2020.
5. BAHAR, Heymi. **Concentrating solar power (CSP): Tracking Clean Energy Progress**. International Energy Agency. 2019.
6. BAHIA TURISMO. **Mapa Rodoviário da Bahia**. 2013. Disponível em: <<http://www.bahia-turismo.com/mapas/mapa-rodoviario.htm>> Acesso em: 04 out. 2020.
7. BENEDITO, Raphael. **Introdução à Operação, Controle e Estabilidade de Sistemas de Potência 2**. 2010. Disponível em: <<https://bit.ly/3fV4nZC>>. Acesso em: 22 nov. 2019.
8. BNDES. **Crédito Projetos Direto para Infraestrutura**. 2020. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento>>. Acesso em: 12 nov. 2020.

9. CHESF. **Centro de Referência em Energia Solar de Petrolina (CRESP)**. 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/2VnbnBa>>. Acesso em: 23 jun. 2020.
10. CHESF. **Chesf lança projeto em Petrolina (PE)**. 2017. Disponível em: <<https://bit.ly/37kUhO1>>. Acesso em: 18 nov. 2019.
11. EPE. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <<https://bit.ly/3ob9lir>>. Acesso em: 10 nov. 2019.
12. EXAME. **Gigante de energia heliotérmica desafia bateria de Elon Musk**. 2018. Disponível em: <<https://bit.ly/3mChuBu>>. Acesso em: 22 nov. 2019.
13. FILHO, Cássio M. O. **Metodologia para implantação de uma usina heliotérmica de receptor central no Brasil**. 87. Projeto de graduação, Engenharia Elétrica, UFRJ, 2014.
14. GLOBAL SOLAR ATLAS. **Mapa Solar Global**. [S.l.] [2019?]. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/map>> Acesso em: 13 nov. 2019.
15. GLOBAL STATUS REPORT. **Renewable Energy Policy Network for the 21st Century**. 2012.
16. GOVERNO DO ESTADO DA BAHIA. **Atlas Solar da Bahia, 2018**. 2018. Disponível em: <<https://bit.ly/2KMkJIC>> Acesso em: 02. out. 2020.
17. Governo do Estado do Ceará. **Atlas Eólico e Solar apresenta potenciais de geração do Ceará**. 2017.
18. Governo Federal. **Energia Heliotérmica: onde existem usinas heliotérmicas**. 2014. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/fatos/onde-existem-usinas-heliotermicas>>. Acesso em: 15 out. 2019.

19. IBGE. **Cidades e Estados**. 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ba.html>>. Acesso em: 30 out. 2020.
20. Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT). **O que é Energia Heliotérmica?**. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/oque-e-energia-heliotermica>>. Acesso em: 02 mai. 2019.
21. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap - Concentrating Solar Power**. 2010.
22. INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. **Total Primary Energy Supply (TPES) by source**. 2018.
23. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Tracking Power 2019**. 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/33vZgtU>>. Acesso em: 23 jun. 2020.
24. INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Global Trends**. 2020. Disponível em: <<https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Costs/Global-Trends>>. Acesso em: 06 nov. 2020.
25. INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable Power Generation Costs in 2017**. 2018. Disponível em: <<https://bit.ly/3lsTfV4>>. Acesso em: 05 nov. 2020.
26. INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Solar Energy**. 2020. Disponível em: <<https://www.irena.org/solar>>. Acesso em: 05 nov. 2020.
27. KRESCH, Daniela. **Maior torre de Energia Solar do mundo é construída em Israel**. 2017. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-41118402>>. Acesso em: 03 mai. 2019.

28. LABORATÓRIO DE MODELAGEM E ESTUDOS DE RECURSOS RENOVÁVEIS DE ENERGIA (LABREN). **Atlas Brasileiro de Energia Solar** - 2ª Edição (2017). 2017. Disponível em: <http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html> Acesso em: 25 out. 2020.
29. LAZARD. **Levelized Cost of Energy and Levelized Cost of Storage – 2020**. 2020. Disponível em: <<https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-and-levelized-cost-of-storage-2020/>>. Acesso em: 07 nov. 2020.
30. LUDEWIG, Stephan. **CONCENTRATED SOLAR POWER (CSP): from niche to winning technology**. Siemens. 2019. Disponível em: <<https://sie.ag/3fSlnyB>> Acesso em: 15 nov. 2019.
31. MALAGUETA, Diego C. **Geração Heliotérmica - Princípios e tecnologias**. 2012. Eletrobras. 2012.
32. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. 2017. Disponível em: <<https://bit.ly/2VjZgZR>> Acesso em: 15 nov. 2019
33. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**. 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/33vZzF4>> Acesso em: 12 nov. 2019
34. NARUTO, Denise T. **Vantagens e desvantagens da geração distribuída e estudo de caso de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica**. 84. Projeto de graduação, Engenharia Elétrica, UFRJ, 2017.
35. National Inventors. Calvin Fuller. 2017. Disponível em: <<https://www.invent.org/inductees/calvin-fuller>>. Acesso em: 06 mai. 2019.

36. NEJI, Lena. **Cost development of future technologies for power generation: A study based on experience curves and complementary bottom-up assessments**. 2008. Disponível em: <<https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/21139655>>. Acesso em: 03 nov. 2020.
37. NETO, Alcides C. **Chesf Torre Solar 1**. 2017. 40 slides. Disponível em: <<https://bit.ly/36mxt0W>>. Acesso em: 11 nov. 2019.
38. NEW ENERGY UPDATES. **CSP 2015 plant data to highlight output costs against techrisk**. 2015. Disponível em: <<https://bit.ly/2KUTOKV>>. Acesso em: 21 nov. 2019.
39. PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; ABREU, Samuel Luna de; RÜTHER, Ricardo; **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2006. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>. Acesso em: 03 mai. 2019.
40. PITZ-PAAL, R. **Concentrating solar power: Still small but learning fast**. 2017. Nature Energy. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nenergy201795>>. Acesso em: 02 nov. 2020.
41. PROJETO DKTI. **Guia de Licenciamento Ambiental de Heliotérmicas**. 2017. Disponível em: <<https://bit.ly/39rbd8h>>. Acesso em 08 nov. 2020.
42. REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. **O potencial de geração de energia fotovoltaica integrada à rede pública de distribuição: “Um exemplo de Açailândia para o Maranhão”**. 2014.
43. RITTER, Kenneth A. et al. **Maintenance of a Small-Scale Parabolic Trough Concentrating Solar Power Plant in Louisiana**. *International Journal of Sustainable and Green Energy*. Vol. 6. 2017. Disponível em: <<https://bit.ly/3obS5zi>>. Acesso em: 2 nov. 2020.

44. SIMPLERAY. **How To Calculate Simple LCOE For Solar Calculator**. 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/3lr2bu4>>. Acesso em: 21 nov. 2019.
45. Solar Energy Industries Association (SEIA). **Concentrating Solar Power**. 2018. Disponível em: <<https://www.seia.org/initiatives/concentrating-solar-power>>. Acesso em: 10 nov. 2019.
46. SOLARPACES. **CSP Projects Around the World**. 2020. Disponível em: <<https://www.solarpaces.org/csp-technologies/csp-projects-around-the-world/>> Acesso em: 10 nov. 2020.
47. SOLARPACES. **Crescent Dunes Solar Energy Project**. 2016. Disponível em: <<https://solarpaces.nrel.gov/crescent-dunes-solar-energy-project>>. Acesso em: 18 nov. 2019.
48. SOLARPACES. **Solar Thermal Electricity - Global Outlook 2016**. 2016. Disponível em: <<https://bit.ly/2VlteMW>> Acesso em: 06 nov. 2020.
49. SolarReserve. **Crescent Dunes**. Disponível em: <<https://www.solarreserve.com/en/global-projects/csp/crescent-dunes.html>> Acesso em: 26 ago. 2019.
50. TECH STARTUPS. **This \$1 billion solar plant was obsolete before it ever went online**. 2020. Disponível em: <<https://techstartups.com/2020/01/06/1-billion-solar-plant-obsolete-ever-went-online/>> Acesso em: 07 nov. 2020.
51. TECMUNDO. **A história da eletricidade e de cientistas que mudaram o mundo**. 2017. Disponível em: <<https://bit.ly/36ogiMq>>. Acesso em: 01 mai. 2019.
52. TRIEB, Franz. et al. **Global Potential of Concentrating Solar Power**. 2009. Em: SOLARPACES CONFERENCE BERLIN, 2009, Berlim.

53. University of California. **History of Solar Two**. 2009. Disponível em:
<<https://bit.ly/39xWMz8>>. Acesso em 30 out. 2019.