



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**PRODUÇÃO**

**ENERGIA SOLAR HELIOTÉRMICA: COMPONENTES DA**  
**TECNOLOGIA *CONCENTRATING SOLAR POWER* ADEQUADAS ÀS**  
**CARACTERÍSTICAS DO NORDESTE BRASILEIRO**

**HELDER RODRIGUES FERREIRA**

**Natal-RN**

**2021**

**HELDER RODRIGUES FERREIRA**

**ENERGIA SOLAR HELIOTÉRMICA: COMPONENTES DA TECNOLOGIA  
CONCENTRATING SOLAR POWER ADEQUADAS ÀS CARACTERÍSTICAS DO  
NORDESTE BRASILEIRO**

Defesa de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

**Orientador:** Dr. Mario Orestes Aguirre González

**NATAL-RN**

**2021**



Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ATA Nº 12

Aos 29 dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e um, foi realizada a sessão de Defesa de Dissertação de Mestrado na qual o(a) Mestrando(a) HELDER RODRIGUES FERREIRA apresentou o trabalho intitulado "ENERGIA SOLAR HELIOTÉRMICA: COMPONENTES DA TECNOLOGIA CONCENTRATING SOLAR POWER ADEQUADAS ÀS CARACTERÍSTICAS DO NORDESTE BRASILEIRO". A sessão iniciou às 17 horas e, em cumprimento ao Ofício Circular Nº 61/2020/PPG/REITORIA/CONSUNI/UFRN, ocorreu de forma inteiramente remota, tendo o(a) aluno(a) e a banca examinadora participado por videoconferência. A banca foi constituída pelos seguintes participantes: MARIO ORESTES AGUIRRE GONZALEZ (Orientador(a) e Presidente da banca, UFRN), MARIANA RODRIGUES DE ALMEIDA (Examinador(a) Interno(a) ao Programa, UFRN) e HUMBERTO DIONISIO DE ANDRADE (Examinador(a) Externo(a) à Instituição, UFRSA). Após a apresentação do trabalho e o exame pela banca, o(a) Mestrando(a) foi considerado(a) APROVADO(A), tendo sido lavrada a presente ata, que vai assinada pelos examinadores e pelo(a) Mestrando(a). A versão final da dissertação deverá ser entregue ao programa no prazo máximo de 60 dias, contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora e constante na folha de correção anexa. Conforme o Artigo 49 da Resolução 197/2013 - CONSEPE, o(a) candidato(a) não obterá o título enquanto não cumprir as exigências acima.

  
Dr. HUMBERTO DIONISIO DE ANDRADE, UFRSA  
Examinador Externo à Instituição

  
Dra. MARIANA RODRIGUES DE ALMEIDA, UFRN  
Examinadora Interna

  
Dr. MARIO ORESTES AGUIRRE GONZALEZ, UFRN  
Presidente

  
HELDER RODRIGUES FERREIRA  
Mestrando

**Reitor da Universidade Federal do Rio Grande do Norte**

Prof. Dr. José Daniel Diniz Melo

**Diretor do Centro de Tecnologia**

Prof. Dr. Luiz Alessandro Pinheiro da Câmara de Queiroz

**Coordenadora do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção**

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mariana Rodrigues de Almeida

**Orientação**

Prof. Dr. Mario Orestes Aguirre González

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Ferreira, Helder Rodrigues.

Energia solar heliotérmica: componentes da tecnologia concentrating solar power adequadas às características do nordeste brasileiro / Helder Rodrigues Ferreira. - 2021.

97 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Pós-graduação em Engenharia de Produção. Natal, RN, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Mario Orestes Aguirre González.

1. Energia Heliotérmica - Dissertação. 2. Energia Termo Solar de Concentração - Dissertação. 3. Energias Renováveis - Dissertação. I. González, Mario Orestes Aguirre. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.472(043.3)

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus Pais e meus Sogros, que perdi durante esta pesquisa, por sempre me iluminarem desde que partiram para outra dimensão, por me transmitirem paciência, fé e sabedoria para que pudesse ter força de vontade em trabalhar nesta pesquisa numa Universidade Pública Federal Brasileira. À minha família, esposa Carla e filhas Leonor e Laura que são a minha fonte inspiradora diária por querer ser sempre melhor e fazer cada vez mais e com a qualidade que elas merecem. À minha família em Portugal que sempre me motivou e demonstra diariamente ter orgulho no meu percurso profissional, sabendo o quanto é difícil ter sucesso a 6000km de casa. Ao meu orientador, o professor Dr. Mario Orestes Aguirre González por toda a confiança depositada no meu trabalho. O Professor Mario foi dos professores mais inspiradores e que conheci em todo o meu percurso acadêmico. Aquele sorriso constante do Professor Mario sempre foi um desbloqueio para as dificuldades que iam surgindo e a sua serenidade, característica intrínseca ao seu perfil, motiva-nos a procurar alternativas e soluções para os problemas com mais alegria e confiança. A todos os meus colegas da turma 2017 do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção por me terem recebido de braços abertos e por me terem apoiado nos momentos difíceis que vive durante este percurso, principalmente nas perdas de meus Pais e Sogros. Um agradecimento especial a Marcus Souto, Lilian Oliveira, Fernanda Barreto, Bruno de Moura, Marrison de Souza, entre outros pelo companheirismo, disponibilidade e apoio incondicional. Aos amigos do Grupo de Pesquisa Cri-Ação por toda a convivência e trabalhos realizados durante esse período em especial a Gabriela Soares, João Agra Neto, João Victor Castro, Marllen Aylla, Viviane, Moniki Melo e Técia Lima. Um agradecimento muito especial ao Rafael Monteiro, um dos maiores ativos do PEP, sempre disponível para ajudar e de um trato excepcional. Ao corpo docente e a coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PEP-UFRN).

## RESUMO

A conscientização política e social, bem como a mudança de paradigma mundial anti-carvão aliado a uma crescente sensibilização da sociedade para tema de energia, nos seus variados aspectos, potenciou uma mudança para o uso de energias renováveis. Das diversas formas de obtenção de energia, a energia termo solar de concentração é uma das que causa menor impacto no meio ambiente, além de ser economicamente viável na atualidade. O objetivo da dissertação é identificar os componentes da tecnologia Energia Termo Solar de Concentração (CSP) adequadas às características de Radiação Solar do Brasil. O estudo se desenvolveu a partir de uma revisão bibliográfica sistemática sobre tecnologias dos componentes da energia solar heliotérmica e um estudo de caso de um projeto de produção de energia elétrica por via solar térmica, com base na tecnologia cilindro-parabólica. Além disso, foram realizados um estudo de produção de energia elétrica por via solar térmica, insolação solar e da radiação solar global para caracterizar as regiões do Brasil. Como resultado observou-se a identificação dos componentes da tecnologia CSP adequadas às características de Radiação Solar do Brasil assim como a identificação de uma localização com viabilidade para a implementação de uma usina de geração de energia.

**Palavras-chave:** *Energia Heliotérmica; Energia termo solar de concentração; Energias renováveis; Radiação Solar.*

## **ABSTRACT**

The political and social awareness, as well as the global anti-coal paradigm shift, allied to a growing awareness of society to the energy issue, in its various aspects, promoted a change to the use of renewable energies. Of the various ways to obtain energy, solar energy is one of the least impacting on the environment, in addition to being economically viable today. In order to identify the components of the Concentration Solar Thermal Energy (CSP) technology suitable for the characteristics of Solar Radiation in Brazil, the study was developed from a systematic literature review on technologies of the components of heliothermal solar energy and a case study of an international project for the production of electrical energy by solar thermal, based on cylinder-parabolic technology. In addition, a study was carried out on the production of electric energy by thermal solar, solar insolation and global solar radiation, as well as acquiring knowledge about the equipment used and the maintenance criteria of the electric energy production unit. As a result, the identification of CSP technology components suitable for the characteristics of Solar Radiation in Brazil was observed, as well as the identification of a location with technical and environmental feasibility for the implementation of a plant.

Keywords: Heliothermal Energy; Concentrating solar thermal energy; Renewable energy; Solar radiation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Concentrações de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) na atmosfera.....	01
Figura 1.2 – Fontes de energias renováveis.....	02
Figura 1.3 – Artigos sobre energia solar heliotérmica publicados por ano.....	06
Figura 2.1 – Etapas do procedimento da pesquisa.....	10
Figura 2.2 – Fases da RBS.....	11
Figura 3.1 – Esquema ilustrativo da trajetória solar.....	19
Figura 3.2 – Parque de Estacionamento na Empresa Portuguesa ProduCanelas.....	20
Figura 3.3 – Exemplo de um sistema ligado à rede de distribuição CEPRN – NATAL.....	21
Figura 3.4 – Exemplo de um sistema híbrido.....	21
Figura 3.5 – Exemplo de um sistema isolado.....	22
Figura 3.6 – <i>Framework</i> funcionamento de uma usina Heliotérmica.....	24
Figura 3.7 – Esquema de Funcionamento de uma usina CSP.....	27
Figura 3.8 – Estimativa do número de dias em que o DNI cai abaixo de 3000 W/m <sup>2</sup> ...29	
Figura 3.9 – Foto de usina heliotérmica com calha parabólica.....	32
Figura 3.10 – Foto de usina heliotérmica com lentes Fresnel.....	33
Figura 3.11 – Foto de usina heliotérmica com torre solar configuração.....	35
Figura 3.12 – Foto de usina heliotérmica com Motores Stirling.....	36
Figura 3.13 – Distribuição dos custos para uma usina com calha parabólica e para uma usina com torre solar.....	40
Figura 3.14 – Capacidade instalada acumulada em função do tempo para fotovoltaica (PV), Eólica e CSP.....	56
Figura 3.15 – Emissão de gases de efeito estufa de ciclo de vida para diferentes fontes de energia (CO <sub>2</sub> equivalente em toneladas por GWh). CCS – Captura e sequestro de carbono, CC – ciclo combinado, GT turbina a gás.....	57
Figura 4.1 – Potência instalada/desenvolvimento em MW.....	59
Figura 4.2 – Usinas Heliotérmicas em todo o mundo.....	60
Figura 4.3 – Potência instalada por países de referência na Energia Heliotérmica (em MW).....	60
Figura 4.4 – Potência em desenvolvimento por países com relevância na energia heliotérmica (em MW).....	61



Figura 4.5 – Imagem panorâmica NOOR 1 CSP.....	61
Figura 4.6 – Construção dos Trabalhos de Construção da usina NOOR 1.....	63
Figura 5.1 – Visualização da declinação no sistema orbital Terra-Sol.....	66
Figura 5.2 – Comparação entre o espectro solar de diferentes tipos de radiação.....	68
Figura 5.3 – Componentes da radiação solar.....	69
Figura 5.4 – Expansão da energia eólica no Brasil – Horizonte 2021.....	70
Figura 5.5 – Linhas de transmissão da região Nordeste (melhores índices de radiação).....	70
Figura 5.6 – Radiação horizontal global na Europa.....	71
Figura 5.7 – Radiação horizontal global na América do Sul.....	71
Figura 5.8 - Temperatura média anual e sazonal no estado do Rio Grande do Norte, baseada em médias climatológicas de 60 anos.....	73
Figura 5.9 - Mapa do Rio Grande do Norte com mapeamento de redes de distribuição de energia elétrica e evidência da localização de área com potencial para instalação de usina heliotérmica.....	73

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 – Previsões de capacidades regionais e globais de CSP (GW) até 2030, 2040 e 2050.....	04
Quadro 2.1 – Caracterização do Método de Pesquisa.....	08
Quadro 2.2 – Periódicos com mais publicações de energia heliotérmica.....	12
Quadro 2.3 – Países com artigos publicados.....	13
Quadro 2.4 – Artigos mais lidos de acordo com o seu método, abordagem e gênero.....	13
Quadro 3.1 – Vantagens da CSP elencadas por autores da área.....	16
Quadro 3.2 – Caracterização de cada parte da usina.....	28
Quadro 3.3 – Caracterização de cada uma das tecnologias de concentrador.....	30
Quadro 3.4 – Impactos Ambientais.....	37
Quadro 3.5 – Características dos vários fluidos de transferência.....	41
Quadro 3.6 – Caracterização dos três meios de armazenamento de calor utilizados em usinas heliotérmicas.....	47
Quadro 3.7 – Sistemas de contenção do armazenamento térmico.....	48
Quadro 3.8 – Potenciais ciclos térmicos.....	54
Quadro 4.1 – Descrição técnica da usina NOOR 1.....	62

## LISTA DE SIGLAS

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior  
CIEMAT – Centro de Investigações Energéticas, Meio-ambientais e Tecnológicas  
CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico  
CSP – Concentrador Cilíndrico Parabólico  
DNI – *Direct Normal Irradiance*  
HTF – Fluido de calor  
JaCCO – Óleo cru de pinhão-manso  
MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações  
MENA – Oriente Médio e Norte da África  
PTC – *Production Tax Credits*  
PV – *Photovoltaic*  
RBS – Revisão Bibliográfica Sistemática  
UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
WMO – *World Meteorological Organization*

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Contextualização .....	1
1.2 Objetivos .....	4
1.2.1 Objetivo Geral.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3 Justificativa .....	5
1.4 Estrutura da dissertação .....	6
<b>CAPÍTULO 2: MÉTODOS DA PESQUISA .....</b>	<b>8</b>
2.1 Caracterização da Pesquisa .....	8
2.2 Procedimentos da Pesquisa.....	10
2.2.1 Revisão bibliográfica sistemática e revisão teórica .....	10
2.2.1.1 Classificação dos artigos analisados da energia solar heliotérmica.....	12
2.2.2 Estudo do caso .....	14
2.2.3 Análise das informações e identificação dos resultados .....	14
<b>CAPÍTULO 3: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>15</b>
3.1 Generalidades da Energia Solar.....	17
3.2 Energia Solar Fotovoltaica.....	19
3.3 Energia Heliotérmica de Concentração .....	23
3.3.1 Modelo conceitual da Energia Solar Heliotérmica.....	24
3.3.1.1 <i>Framework</i> do funcionamento de uma Usina Heliotérmica .....	24
3.3.1.2: Tecnologia de Concentrador .....	29
a) Calha Parabólica.....	31
b) Refletores de Fresnel .....	32
c) Torre Solar .....	33
d) Motores Stirling.....	35
3.3.1.3 Condições para instalação das usinas .....	36
a) Meio Ambiente.....	36
b) Área necessária.....	38
c) Custos da usina .....	39
d) Fluido de transferência .....	40
e) Armazenamento térmico.....	45
f) Aplicações .....	49
1) Hibridização .....	50

2) Dessalinização.....	51
g) Desempenho .....	52
1) Capacidade, eficiência e potência .....	52
2) Ciclo termodinâmico .....	53
h) Comparação com outras tecnologias .....	55
<b>CAPÍTULO 4: ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>59</b>
4.1 Projetos de usinas de energia heliotérmica e seleção do caso .....	59
4.2 Histórico da Usina NOOR .....	61
4.3 Descrição Técnica da Usina NOOR 1 .....	62
4.4 Projeto e operação da usina Noor 1 .....	63
<b>CAPÍTULO 5: CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E METEOROLÓGICAS NO BRASIL E TECNOLOGIAS APROPRIADAS CSP PARA A REGIÃO NORDESTE.....</b>	<b>66</b>
5.1 Condições meteorológicas e climáticas do Brasil .....	66
5.1.1 Radiação solar incidente na superfície terrestre.....	68
5.2 Regiões no Brasil mais propícias para a instalação de uma usina Heliotérmica .....	69
5.3 Componentes da tecnologia CSP adequadas à região Nordeste do Brasil.....	74
<b>CAPÍTULO 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSOES E RECOMENDACOES .....</b>	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICE A: PROTOCOLO DA PESQUISA DE CAMPO .....</b>	<b>83</b>

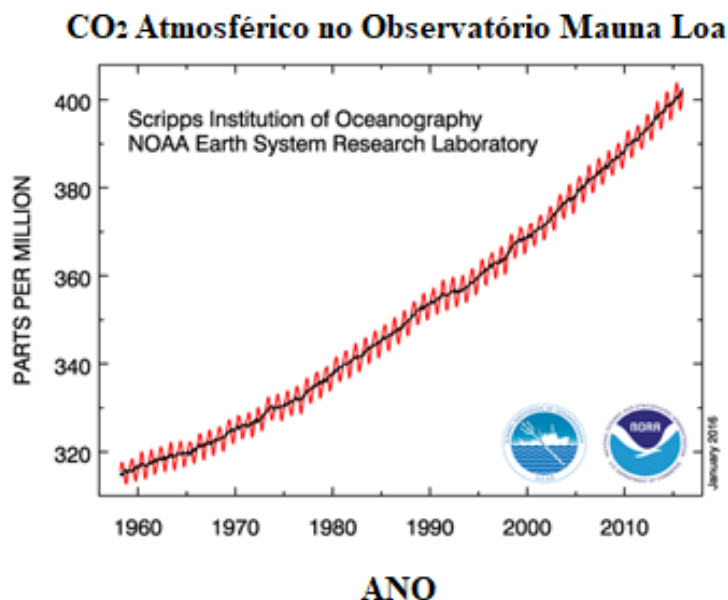
## CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

É do conhecimento geral que o crescimento do consumo de energia, verificado durante muitos anos, não pode continuar indefinidamente, pois existe um limite para as reservas de combustíveis fósseis (COCCO; SERRA, 2015). Por outro lado, o uso de combustíveis fósseis tem alterado substancialmente a composição da atmosfera e o balanço térmico do planeta, provocando o aquecimento global, chuvas ácidas e poluição do meio ambiente (LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012; KOST; FLATH; MÖST, 2013).

O problema do efeito estufa provocado, principalmente pela queima de combustíveis fósseis nas centrais termoelétricas para produção de energia elétrica, origina emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para a atmosfera de forma crescente, conforme mostra a Figura 1.1. O efeito estufa influencia o clima devido às mudanças de concentrações atmosféricas dos diversos gases que retêm parte da radiação infravermelha.

Figura 1.1 – Concentrações de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na atmosfera.



Fonte: NOAA Earth System Research Laboratory (2019).

Em 1997 foi aprovado no âmbito das Nações Unidas, o Protocolo de Quioto, em que esse protocolo identificou outros gases responsáveis pelo aumento do efeito estufa, além do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), como o metano ( $\text{CH}_4$ ), o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), os clorofluorcarbonetos (CFCs), os hidrofluorcarbonetos (HFCs), os

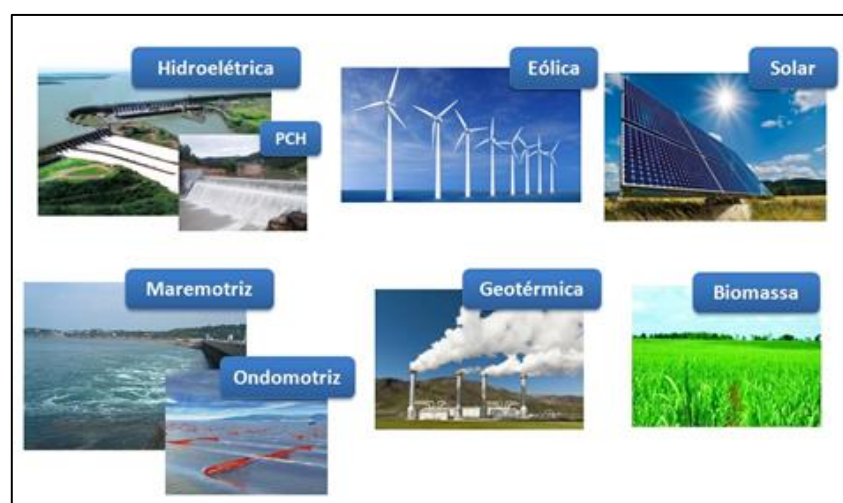
perfluorcarbonetos (PFCs) e o SF<sub>6</sub> ou hexafluoreto de enxofre, o gás com maior potencial de aquecimento global, muito usado nos sistemas de transmissão e distribuição de eletricidade (NOAA, 2019).

O Protocolo de Quioto fixou como principal objetivo a redução da emissão de gases em pelo menos 5,2% relativamente aos níveis de 1990, no período entre 2008 e 2012. No entanto, as metas de redução não são homogêneas a todos os países e foram colocados níveis diferenciados para os países que emitem mais gases. O mesmo se verificou durante o COP20 em 2015 no Peru, em que todas as decisões da maioria dos países não passaram de memorandos de intenções, não se verificando evoluções consistentes e pragmáticas que sejam relevantes. No entanto, apesar de existirem metas, estas por si só não são suficientes, sendo necessário investir na pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias.

A produção de energia por meio de fontes alternativas surge como primeira resposta a esses problemas. A comunidade científica internacional dedica-se há várias décadas à pesquisa de formas de aproveitar os recursos renováveis que o planeta Terra dispõe: água, vento e sol (NeoSOLAR, 2019).

As fontes de energias renováveis, apresentadas na Figura 1.2, são uma opção viável e vantajosa, uma vez que são fontes inesgotáveis e apresentam um impacto ambiental muito baixo, não afetam o balanço térmico ou mesmo a composição atmosférica do Planeta.

Figura 1.2 – Fontes de energias renováveis.



Fonte: NeoSolar (2019).

Das diversas energias renováveis, uma das mais abundantes é a energia solar (COCCO; SERRA, 2015), pelo que o seu eficaz aproveitamento o torna opção como uma das soluções para os problemas de escassez de energia e impacto ambiental existentes no Planeta. Essa energia pode ser utilizada em sistemas que a convertam para energia elétrica, térmica, química ou mecânica.

As tecnologias de conversão da energia solar em energia térmica têm desenvolvimentos distintos em função das gamas de temperaturas necessárias. Para as aplicações que requerem baixas temperaturas (até 90°C), tipicamente para aquecimento de água, existe uma tecnologia bem desenvolvida e madura. Nas temperaturas médias (90°C a 150°C) podem considerar-se dois tipos distintos de aplicações: industriais e condicionamento de ar (aquecimento e arrefecimento), recorrendo a máquinas frigoríficas. As temperaturas superiores têm interesse em aplicações industriais e na produção de energia elétrica por via térmica (COCCO; SERRA, 2015).

De todas as tecnologias emergentes dentro da Energia Heliotérmica, a que mais se destaca principalmente pela sua modularidade e eficiência é a de Tecnologia CSP (Concentrador cilíndrico – parabólico) (PITCHUMANI, 2017; NREL, 2020; MÖST, 2013, MOHAMMADI; 2019, KHORASANIZADEH, 2019). Essa é uma tecnologia com muitas comprovações, porém, ainda não se atingiu o final da curva de aprendizagem. As estruturas avançadas em desenvolvimento permitirão a melhoria da precisão óptica e ao mesmo tempo reduzir o peso e o custo (LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012; KOST; FLATH; MÖST, 2013; PITCHUMANI, 2019; MOHAMMADI, 2019; KHORASANIZADEH, 2019).

Aumentando o comprimento dos coletores, as perdas podem ser reduzidas e aumentadas as economias nas tubagens (PITCHUMANI, 2019). Os absorvedores da próxima geração também irão permitir a redução das perdas térmicas e ao mesmo tempo aumentar a fiabilidade. As melhorias no meio de transferência de calor irão permitir o aumento da temperatura de operação e do rendimento.

As centrais da tecnologia cilindro-parabólica podem ter a médio prazo uma dimensão superior a 200 MW. No Quadro 1.1, encontra-se apresentada a evolução prevista dos parâmetros técnicos da tecnologia cilindro-parabólica para os próximos



anos, sabendo que esta é uma tecnologia madura e, por isso, é a preferida nos atuais projetos de centrais para ligação à rede na Europa e no Sudoeste dos Estado Unidos.

Quadro 1.1 – Previsões de capacidades regionais e globais de CSP (GW) até 2030, 2040 e 2050.

	United States	Other OECD Americas	EU	Other OECD	China	India	Africa	Middle East	Other developing Asia	Non-OECD Americas	World
2013	1.3	0.01	2.31	0.01	0.02	0.06	0.06	0.10	0.02	0	4.1
2030	87	6	15	4	29	34	32	52	0.3	2	261
2040	174	18	23	12	88	103	106	131	3	7	664
2050	229	28	28	19	118	186	147	204	9	15	982

Fonte: Mohammadi (2019) e Khorasanizadeh (2019).

O mercado de energia heliotérmica será superior a 24 GW até 2025, segundo estudos internacionais (NREL, 2018). A diminuição do custo dos componentes e os incentivos governamentais favoráveis, incluindo créditos de carbono e certificados de energia renovável, tendem fazer o mercado global de energia heliotérmica crescer nos próximos anos.

Perante o exposto, o questionamento que deu origem a pesquisa foi “Quais são os componentes da Tecnologia CSP mais adequados para as condições meteorológicas e climáticas da região Nordeste do Brasil?”. Para responder essa questão foi definida o objetivo da pesquisa descrita na seguinte seção.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Identificar os componentes da tecnologia CSP adequadas às características de radiação solar da região Nordeste do Brasil.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar os componentes e as tecnologias utilizadas pelas usinas Heliotérmicas e caracterizá-los por meio de uma pesquisa bibliográfica sistemática;

- Analisar um projeto de energia elétrica por via solar Heliotérmica com base na tecnologia cilindro-parabólica, por meio de estudo de caso;
- Caracterizar as condições meteorológicas e climáticas do Brasil;
- Sistematizar os componentes mais adequados da tecnologia CSP para as características da radiação solar do Nordeste brasileiro.

### **1.3 Justificativa**

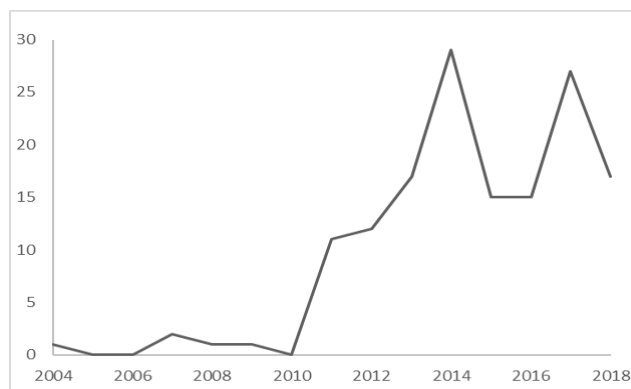
A preocupação com o aquecimento global se intensificou nos últimos anos e a energia solar é considerada a fonte alternativa de energia mais atraente para o futuro, pois além das suas características não poluentes, a quantidade de energia disponível para conversão é maior ao consumo energético mundial (MÖST, 2013; PITCHUMANI, 2019; MOHAMMADI, 2019; KHORASANIZADEH, 2019).

O Sol emite para o planeta radiações caloríficas que aproveitadas podem fornecer a energia que o mundo necessita para manter o atual padrão de vida. O Brasil tem uma insolação que varia entre 2200 e 3100 horas de Sol por ano, na qual é considerada uma fonte de energia ainda pouco aproveitada. Essas circunstâncias irão proporcionar o desenvolvimento desta temática.

A energia heliotérmica está sempre disponível, pois a usina com armazenamento térmico, permite geração de energia mesmo em dias nublados ou durante a noite (COCCO; SERRA, 2015; PITCHUMANI, 2019). Ela oferece energia despachável, ou seja, sempre que for necessário.

Da perspectiva acadêmica, pelas publicações de artigos, observa-se que o tema da energia solar heliotérmica está em ascensão, conforme mostra a Figura 1.3.

Figura 1.3 – Artigos sobre energia solar heliotérmica publicados por ano.



Fonte: Elaboração própria.

O levantamento englobou a análise de 148 artigos, publicados do período de 2004 a 2018, no qual, nesse período, houve uma média de 12 artigos publicados por ano, havendo anos sem publicação e a maior quantidade de publicações no ano de 2014 com 29 artigos publicados, seguido pelo ano de 2017, com 27 artigos publicados.

Contudo esta pesquisa justifica-se do ponto de vista socioambiental, pelo estudo de energia renovável e limpa, e do ponto de vista acadêmico, pois reforçará literatura nacional sobre a temática, além de poder se tornar referência.

#### 1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação está estruturada em 6 capítulos. No capítulo 1 discorre-se sobre a temática e a sua importância no contexto atual da sustentabilidade do meio ambiente e dos problemas energéticos, apresentando, também, os objetivos que se pretende atingir, bem como a motivação e a estruturação da dissertação.

No Capítulo 2, é abordado os métodos de pesquisa aplicados no trabalho e os procedimentos de pesquisa utilizados para atingir os objetivos propostos.

No capítulo 3 efetua-se um estudo sobre as principais características do Sol e sobre a radiação solar, dando especial atenção à radiação solar incidente na superfície terrestre, à direção da radiação direta e à radiação média incidente numa superfície inclinada. O estudo da energia solar apresenta o modo como pode ser aproveitada (energia solar fotovoltaica e energia solar térmica) e quais as tecnologias atualmente disponíveis que permitem implementar tal função. No que concerne ao

assunto da energia solar térmica, foca-se principalmente o tema relacionado com a produção de eletricidade a partir da energia solar por conversão térmica, apresentando as tecnologias existentes para a produção de eletricidade e evidenciando, principalmente, a tecnologia cilindro-parabólica.

O capítulo 4 trata do estudo de caso com a descrição de um projeto de Energia Termosolar de Concentração, neste caso a USINA NOOR1 instalada na região do Marrocos, em que utilizando-se de um questionário aplicado, obteve-se informações para descrever a parte técnica e operacional da usina.

No capítulo 5 faz-se uma análise relativamente às condições climáticas e meteorológicas no Brasil, de forma a ser possível identificar o local mais adequado para se implementar a Tecnologia CSP, tendo em conta os seus componentes e a tecnologia em si.

Por fim, no capítulo 6, apresenta-se as conclusões, desenvolvimentos, limitações do trabalho, além das recomendações futuras sobre a temática deste trabalho.

## CAPÍTULO 2: MÉTODOS DA PESQUISA

Neste capítulo são apresentados a caracterização da pesquisa, de acordo com a literatura sobre metodologia científica e o procedimento da pesquisa adotado para atingir os objetivos propostos.

### 2.1 Caracterização da Pesquisa

A pesquisa científica consiste em um procedimento formal, com método de pensamento reflexivo, que requer tratamento científico para conhecer a realidade e descobrir novos fatos, relações ou leis. Neste trabalho, o método de pesquisa seguido é descrito em dois subtópicos:

- 1) Caracterização do método de pesquisa tendo como referência a bibliografia sobre metodologia de pesquisa;
- 2) Procedimento seguido na realização da pesquisa.

Primeiro, na bibliografia sobre metodologia de pesquisa científica, existem diversos critérios para caracterizar e classificar os métodos de pesquisa (DEMO, 2000; YIN, 2001). O Quadro 2.1 apresenta a caracterização do método de pesquisa.

Quadro 2.1 – Caracterização do Método de Pesquisa.

	TIPOLOGIA	CARACTERÍSTICAS	ESCOLHA
Quanto à natureza	Básica	Gera novos conhecimentos, mas sem aplicação prática prevista.	
	Aplicada	Gera conhecimentos para aplicações práticas na solução de problemas específicos.	√
Quanto à forma de abordagem ao problema	Pesquisa Quantitativa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Objetiva;</li> <li>• Lida com tudo que é possível quantificar;</li> <li>• Traduz opiniões e números em informações que serão analisadas e classificadas;</li> <li>• Possui amostras com expressivo número de pesquisados;</li> <li>• Os dados são quantificados estatisticamente.</li> </ul>	
	Pesquisa Qualitativa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A relação entre o mundo e o fato a ser investigado não se traduz em números;</li> <li>• O pesquisador busca se aprofundar em questões subjetivas do fenômeno;</li> <li>• Os dados podem ser coletados por entrevistas, observações, narrativas e documentos;</li> <li>• Analisa opiniões, não é representativa e tem caráter exploratório;</li> </ul>	√

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Feita com amostras pequenas, não utiliza métodos estatísticos.</li> </ul>	
	Qualitativa - Quantitativa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Define procedimentos para conduzir estudos de métodos mistos (CRESWELL, 2003).</li> </ul>	
Quanto aos objetivos	Pesquisa Exploratória	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tende a buscar familiaridade com problemas pouco conhecidos;</li> <li>• Envolve levantamento bibliográfico, entrevistas e análise de cases.</li> </ul>	√
	Pesquisa Descritiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descreve características de um fenômeno/fato/população; não busca as causas;</li> <li>• Utiliza técnicas padronizadas de coleta de dados (questionário e observação).</li> </ul>	
	Pesquisa Explicativa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identifica fatores que determinam fenômenos; explica o porquê das coisas;</li> <li>• Pode ocorrer na forma de pesquisa experimental e estudos prospectivos.</li> </ul>	
Quanto aos procedimentos técnicos	Pesquisa Bibliográfica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolvida a partir de material já publicado, como livros, artigos, periódicos, internet e outros.</li> </ul>	√
	Pesquisa Documental	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolvida a partir de material que não recebeu tratamento analítico.</li> <li>• Podem ser utilizados registros, anais, circulares e outros materiais.</li> </ul>	
	Pesquisa Experimental	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elaborada a partir de um objeto de estudo determinado no qual se verifica a influência de variáveis, identificam-se formas de controle e observam-se os efeitos que as variáveis produzem no objeto.</li> </ul>	
	Levantamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utiliza-se de questionários para compreender o comportamento dos sujeitos.</li> </ul>	
	Estudo de Caso	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estuda profundamente um objeto a fim de revelar um conhecimento intenso sobre ele.</li> <li>• É usado como ferramenta de pesquisas descritivas.</li> <li>• Verifica a situação de indivíduos, empresas e comunidades.</li> </ul>	√
	Pesquisa-ação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os pesquisadores e sujeitos de uma investigação estão envolvidos de modo cooperado ou participativo.</li> <li>• Participante desenvolvido pela interação entre pesquisador e sujeitos investigados.</li> </ul>	

Fonte: Elaboração própria.

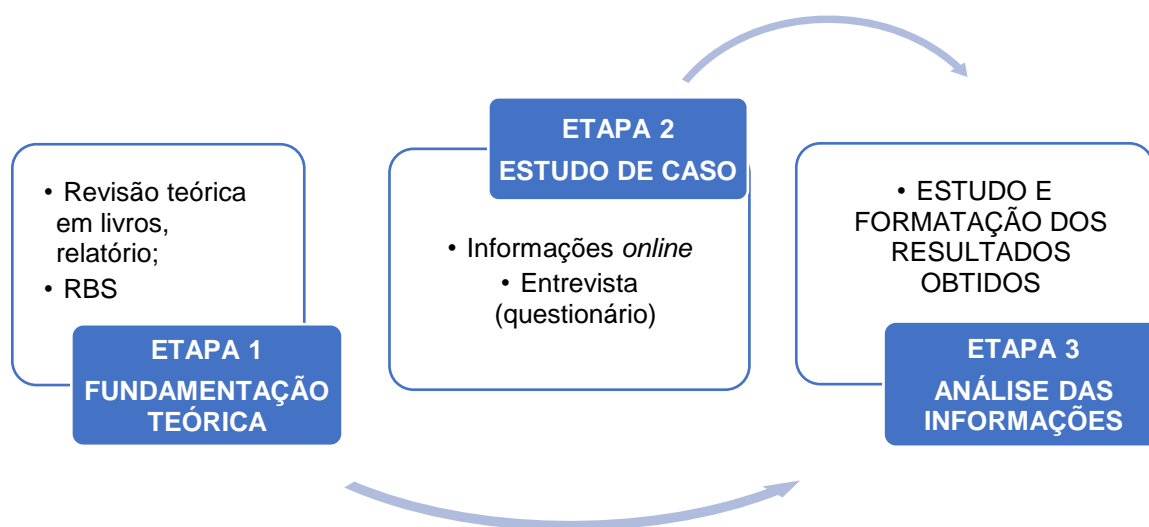
Considerando o gênero da pesquisa, ela enquadra-se como pesquisa empírica e teórica. Considerando o fator objetivo, a pesquisa tende a ser exploratória, tendo como principal produto uma descrição genérica das tecnologias da Energia Heliotérmica apropriadas para a região nordeste do Brasil. Quanto ao tipo de argumentação lógica, a utilizar na pesquisa, irá prevalecer o indutivo, uma vez que a

partir da revisão bibliográfica e do estudo de caso se induziu a responder a questão da pesquisa. Considerando a abordagem da pesquisa, caracteriza-se como qualitativa. Quanto ao método de procedimento, a pesquisa classificar-se-á como estudo de caso único.

## 2.2 Procedimentos da Pesquisa

O procedimento da pesquisa seguiu três etapas, conforme apresenta-se na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Etapas do procedimento da pesquisa.



Fonte: Elaboração própria.

### 2.2.1 Revisão bibliográfica sistemática e revisão teórica

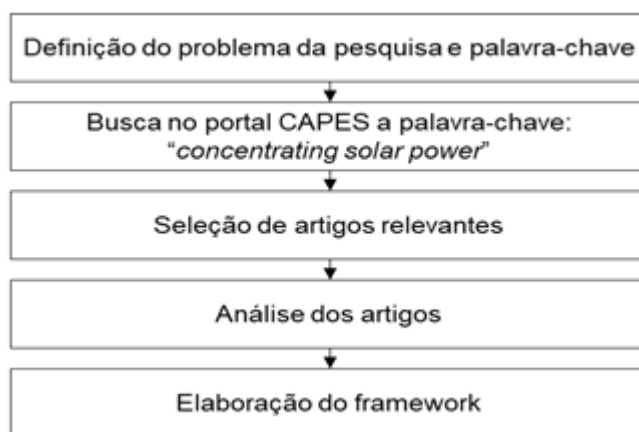
A primeira etapa contemplou uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) sobre energia solar heliotérmica e uma revisão tradicional da literatura sobre tipos de energia solar, legislação brasileira sobre energia heliotérmica, componentes da tecnologia heliotérmica e características da radiação solar do Brasil.

A RBS tem sua importância na identificação de informações relevantes em determinado tópico, pois preenche lacunas de certo artigo com informações dos demais. Dessa forma, traz um avanço do conhecimento e facilita o entendimento sobre certo tema. Uma RBS constrói um conhecimento e entendimento sobre o assunto de forma eficaz. Além disso proporciona a percepção de lacunas sobre

determinado assunto, possibilitando sugestão a pesquisadores de novos estudos (WEBSTER, 2002).

O procedimento da RBS foi estruturado em cinco fases, conforme Figura 2.2, sendo o primeiro a definição do problema e das palavras-chave. Nessa fase surgiu a seguinte questão: Como a energia solar heliotérmica está sendo abordada nos estudos científicos? Para responder à pergunta foi determinada a palavra-chave “concentrating solar power”.

Figura 2.2 – Fases da RBS.



Fonte: Elaboração Própria.

A segunda fase foi a busca da palavra-chave determinada no portal da Capes, que reuni bases de dados como: ACM, ACS, AIP, Blackwell, Cambridge University Press, Emerald, Gale, HighWire Press, IEEE, Nature, OECD, OVID, Oxford University Press, ProQuest, Sage, SciELO, Science Direct Online e Wilson. Para focalizar a pesquisa foram utilizados os parâmetros de “só línguas inglesas” e “só artigos”, resultando em 270 artigos.

A terceira fase considerou a seleção dos artigos relevantes para a pesquisa por meio da leitura do título e dos resumos dos artigos, sendo selecionados ao todo 98 artigos.

A quarta fase foi a análise dos artigos selecionados, a partir da leitura e classificação, em que se conclui a necessidade da inclusão de mais uma palavra-chave: “solar termal” no título com “concentrating solar power”, sendo citado no artigo. Com uma nova busca das duas palavras-chave e leitura dos resumos dos artigos foram adicionados à análise completa mais 50 artigos.



Na quinta fase, com a leitura de 148 artigos, 130 deles foram considerados relevantes para a pesquisa.

### 2.2.1.1 Classificação dos artigos analisados da energia solar heliotérmica

Os 148 artigos levantados foram publicados em 57 periódicos, em que 41 deles apenas possui 1 artigo no tema. Os periódicos que possuem a maior quantidade de artigos são “Solar Energy Journal” que publicou 15% dos artigos e o “Renewable and Sustainable Energy Review” com 14% dos artigos analisados.

O Quadro 2.2 apresenta os periódicos que mais possuem publicações com assuntos relacionados à Energia Heliotérmica, no período de 2004 a 2018. Os periódicos apresentados no Quadro 2.2 compreendem 66% dos artigos analisados, com 97 dos 148 artigos.

Quadro 2.2 – Periódicos com mais publicações de energia heliotérmica.

Periódicos	Artigos
Solar Energy	22
Applied Energy	21
Renewable and Sustainable Energy Reviews	12
Renewable Energy	9
Energy	8
Energy Policy	7
Applied Thermal Engineering	4
Solar Energy Materials and Solar Cells	4
Energy Conversion and Management	4
Energy Policy Journal	3
Desalination	3

Fonte: Elaboração Própria.

Quanto a distribuição geográfica dos artigos, a maioria são de autores dos Estados Unidos (50), seguida pela China (23) e Espanha (16). O Quadro 2.3 traz informações dos 12 países que mais possuem artigos publicados, compreendendo 91% dos artigos analisados. Há 1 artigo publicado nos países: Arábia Saudita, Bélgica, Burkina Faso, Chile, Dinamarca, Israel, Japão, Reino Unido, Suécia e Ucrânia.

Quadro 2.3 – Países com artigos publicados.

País	Artigos
Estados Unidos	50
China	23
Espanha	16
Austrália	11
Alemanha	9
Itália	8
Índia	5
Malásia	4
África do Sul	3
Argélia	2
França	2
Suíça	2

Fonte: Elaboração Própria.

Os artigos analisados foram classificados de acordo com o método, a abordagem e o gênero. De acordo com o método da pesquisa, a maioria dos artigos possuem estudos experimentais, que fazem alguma pesquisa com variáveis controladas em relação ao tema. Quanto a abordagem, a maior parte dos artigos são quantitativos descritivos, pois descrevem algum cenário de acordo com dados numéricos. E analisando o gênero, a maior quantidade de artigos é uma pesquisa prática, em que a pesquisa foca em uma aplicação específica. O Quadro 2.4 traz informações dos artigos lidos

Quadro 2.4 – Artigos mais lidos de acordo com o seu método, abordagem e gênero.

	Classificação	Artigos
<b>Método</b>	Revisão de Literatura	36
	Survey	0
	Experimental	61
	Pesquisa-ação	5
	Estudo de casos	38
<b>Abordagem</b>	Qualitativo descritivo	41
	Qualitativo preditivo	5
	Quantitativo descritivo	71
	Quantitativo preditivo	31
<b>Gênero</b>	Teórico	58
	Metodológico	4
	Empírica	2
	Prática	72

Fonte: Elaboração Própria.

### **2.2.2 Estudo do caso**

A segunda etapa do método de pesquisa envolveu a pesquisa de campo com a realização do estudo de caso. As informações utilizadas no caso consideraram: i) informações em relatórios técnicos e *sites* que citam a usina; ii) reportagens da usina e; iii) entrevistas.

Foram realizadas entrevistas com uso do questionário (Apêndice 1) que teve como direcionadores, as informações resultantes da RBS. O estudo de caso foi realizado na Usina NOOR 1 da ACWA Power, localizada a 200 km ao sul de Marraquexe, no Marrocos, na qual utiliza a tecnologia CSP.

A justificativa da seleção dessa usina deu-se, primeiro, pela sua capacidade instalada e, segundo, por ser uma das mais antigas em entrar em operação, pelo que os dados levantados também contemplam da sua operação.

### **2.2.3 Análise das informações e identificação dos resultados**

A terceira etapa trata da análise das informações obtidas. Em princípio foi realizado o levantamento das características climáticas e meteorológicas do Brasil, com ênfase na região Nordeste. Em seguida, foi realizada a análise das tecnologias mais adequadas, identificadas na RBS e considerando o estudo de caso, para implantação de usinas heliotérmicas na região Nordeste do Brasil.

### **CAPÍTULO 3: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Este capítulo contempla uma análise do estado da arte, explicando as principais diferenças entre energia fotovoltaica e energia heliotérmica. Também são descritos os vários tipos de tecnologias na energia solar heliotérmica através de uma revisão bibliográfica sistemática, fazendo referência às vantagens, desvantagens, eficiência, tipos de armazenamento e outras características importantes.

A radiação é uma forma de transferência de energia que não requer nem suporte intermediário nem contato com o corpo radiante. A radiação solar é a emissão de energia, sob a forma de ondas eletromagnéticas, proveniente do Sol. Na radiação solar distingue-se da radiação global, que corresponde à totalidade da energia proveniente do Sol e recebida na Terra, da radiação direta, que corresponde à energia recebida diretamente do Sol, excluída aquela que foi difundida pela atmosfera e pelas nuvens (radiação difusa) (PITCHUMANI, 2019, MOHAMMADI, 2019).

O conhecimento dos vários fluxos de radiação recebida e perdida pela Terra é de elevado interesse para diferentes aplicações, inclusive para o balanço dos níveis de radiação necessários as várias atividades humanas. A quantidade total de radiação solar interceptada pela Terra, por dia, é aproximadamente equivalente à energia produzida por cem milhões de grandes centrais, mas é apenas uma parte em dois bilhões da quantidade total da radiação emitida pelo Sol (PITCHUMANI, 2019; MOHAMMADI, 2019).

Uma Usina Termosolar de Concentração utiliza o calor, proveniente dos raios solares para gerar eletricidade, e coletores solares de concentração que fornecem altas temperaturas a uma turbina, possibilitando sua rotação. Possui a mesma tecnologia de motor utilizada em usinas nucleares e de recursos fósseis para gerar eletricidade e, por isso, essa tecnologia está madura, pois vem absorvendo melhoras com o tempo (PITZ-PAAL, 2017). Quanto ao coletor solar, existem 4 tipos de tecnologias: a calha parabólica, a torre solar, os refletores de Fresnel e o prato parabólico (ISLAM et al., 2018; PITZ-PAAL, 2017).

Esse tipo de geração de eletricidade necessita de um recurso principal que é a radiação solar em alta intensidade, normalmente encontrado em locais semiáridos. Assim, para serem obtidos bons resultados é necessário que a região a

ser instalada tenha uma boa climatologia com altos níveis de radiação solar (FERNÁNDEZ; DIESTE, 2013).

A primeira usina de CSP começou a operar na Califórnia (EUA), entre 1984 a 1991, com auxílios de incentivos do Governo dos Estados Unidos. Com a queda nos preços dos combustíveis, a CSP perdeu incentivos e só retomou o destaque em 2006 com incentivos na Espanha e nos EUA (IEA, 2010). A usina com maior capacidade instala hoje se localiza nos EUA, no deserto da Califórnia e possui 354 MW de capacidade instalada, gerando 662 GW por ano (POWER TECHNOLOGY, 2013).

Dados de junho de 2019 mostram que a capacidade instalada de usinas heliotérmicas no mundo em operação está em 5,7 GW. Considerando as usinas em operação, em construção e usinas em desenvolvimento, são 9,6 GW de capacidade no mundo, sendo a Espanha com a maior capacidade instalada com 2,3 GW e, em seguida, os Estado Unidos com 1,7 GW (SOLARPACES, 2019). Estima-se que em 2050 a capacidade instalada no mundo chegará a 1.500 GW, dessa forma, contribuindo com 5% da geração anual de eletricidade no mundo (IEA, 2010).

A CSP é considerada uma forma de energia promissora, com baixo impacto ambiental e alto potencial energético (BAI; SUN; LIU, 2018; XU et al., 2016). O Quadro 3.1 traz as vantagens da CSP elencadas por autores da área.

Quadro 3.1 – Vantagens da CSP elencadas por autores da área.

VANTAGENS	AUTORES
Armazenamento térmico	(BAHAROON et al., 2014; BATUECAS et al., 2017; HAMED et al., 2016; HERNÁNDEZ-MORO; MARTÍNEZ-DUART, 2014; HINKLEY et al., 2013; KOST; FLATH; MÖST, 2013; LIM et al., 2017; LIU et al., 2015; MCFARLANE et al., 2014; MODI et al., 2016; MOON et al., 2014; PITCHUMANI, 2017; PITZ-PAAL, 2017; PY et al., [s.d.]; TRIEB; FICHTER; MOSER, [s.d.]; UMMADISINGU; SONI, 2011; WANG et al., 2017; WEINSTEIN et al., 2015)
Hibridização	(HAMED et al., 2016; HERNÁNDEZ-MORO; MARTÍNEZ-DUART, 2014; HINKLEY et al., 2013; MOON et al., 2014; TRIEB; FICHTER; MOSER, [s.d.]; UMMADISINGU; SONI, 2011; WANG et al., 2017)
Baixo custo em locais com alta radiação solar	(HERNÁNDEZ-MORO; MARTÍNEZ-DUART, 2014)
Baixa emissão de gases do efeito estufa	(HERNÁNDEZ-MORO; MARTÍNEZ-DUART, 2014)
Eficiência na conversão de energia	(MOON et al., 2014)

Fonte: Elaboração Própria.

As principais vantagens da CSP em relação as demais energias renováveis são a possibilidade de utilizar o armazenamento térmico e de combinar a geração de eletricidade com combustíveis (HAMED et al., 2016; HINKLEY et al., 2013; UMMADISINGU; SONI, 2011; WANG et al., 2017).

O armazenamento térmico possibilita que a usina armazene calor e utilize em momentos com recurso solar insuficiente, em dias nublados ou no período noturno, diferente de baterias utilizadas em usinas fotovoltaica e eólicas, em que não é armazenado a eletricidade e, sim, o calor proveniente da radiação solar, viabilizando o armazenamento com custos mais baixos (BATUECAS et al., 2017; HINKLEY et al., 2013; PITCHUMANI, 2017; PY et al., [s.d.]; UMMADISINGU; SONI, 2011; WEINSTEIN et al., 2015).

Quanto a hibridização das usinas, esse mecanismo possibilita que em momento de pico, em que a radiação solar não é suficiente para gerar a energia demandada, seja possível utilizar combustíveis para suprir a demanda (HAMED et al., 2016; HERNÁNDEZ-MORO; MARTÍNEZ-DUART, 2014; HINKLEY et al., 2013; MOON et al., 2014; UMMADISINGU; SONI, 2011; WANG et al., 2017).

### **3.1 Generalidades da Energia Solar**

O planeta Terra identifica-se como um sistema termodinâmico não isolado, onde no seu interior processam-se inúmeras evoluções caracterizadas pela permuta de energia e a geração de entropia. A única energia que recebe do exterior provém do Sol, reenviando-a praticamente nas mesmas quantidades sob a forma de radiação de pequeno comprimento de onda. Uma pequena parte é diretamente refletida e outra parte é armazenada nas plantas através da fotossíntese (Portal Solar, 2020).

A quantidade de energia solar que chega, por unidade de tempo e por unidade de área, a uma superfície perpendicular aos raios solares, à distância média Terra-Sol, chama-se constante solar, onde o seu valor é de  $1.367 \text{ W/m}^2$ . Os usos que podemos fazer dessa energia depende muito da trajetória aparente do Sol e da duração da exposição solar (ISLAM et al., 2018; ZHANG et al., 2013). A intensidade da radiação é determinada pelo ângulo de incidência dos raios solares e o que define a duração da exposição solar é a trajetória aparente do Sol. Embora a órbita da Terra em torno do Sol seja uma elipse, e não um círculo, a distância da Terra ao Sol varia somente 3%, sendo que a Terra está mais próxima do Sol entre 4 e 7 de janeiro de

cada ano, dependendo do ano bissexto. Mas também cabe lembrar que o hemisfério Norte da Terra também está mais próximo do Sol em janeiro, época da estação inverno, enquanto é verão no hemisfério Sul. O afélio (distância máxima entre o Sol e órbita da Terra) ocorre entre 4 e 7 de julho de cada ano (ISLAM et al., 2018; ZHANG et al., 2013).

O que causa as estações do ano é o fato da Terra orbitar o Sol com o eixo de rotação inclinado, e não perpendicular ao plano orbital. O ângulo entre o plano do Equador e o plano orbital da Terra é chamado obliquidade da eclíptica e corresponde a  $23^{\circ}27'$ . Também podemos definir a obliquidade como a inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao eixo perpendicular à eclíptica (plano orbital da Terra). Devido a essa inclinação, à medida que a Terra orbita em torno do Sol, os raios solares incidem mais diretamente em um hemisfério do que em outro, proporcionando mais horas com luz durante o dia em um hemisfério e, portanto, aquecendo-o mais.

No Equador todas as estações são muito parecidas: todos os dias do ano o Sol fica 12 horas acima do horizonte e 12 horas abaixo do horizonte; a única diferença é a máxima altura que ele atinge. No equador, nos equinócios, o Sol faz a passagem meridiana pelo zênite, atingindo a altura de  $90^{\circ}$  no meio-dia verdadeiro. Nas outras datas do ano o Sol passa o meridiano ao norte do zênite, entre os equinócios de março e de setembro, ou ao sul do zênite, entre os equinócios de setembro e de março. As menores alturas do Sol na passagem meridiana são de  $66,5^{\circ}$  e acontecem nas datas dos solstícios (ISLAM et al., 2018; ZHANG et al., 2013).

Portanto a altura do Sol ao meio-dia no Equador não muda muito ao longo do ano e, conseqüentemente, nessa região não existe muita diferença entre inverno, verão, primavera e outono, conforme apresenta a Figura 3.1, da trajetória solar.

Figura 3.1 – Esquema ilustrativo da trajetória solar.



Fonte: Elaboração própria.

Estando o Sol presente na origem de praticamente todas as fontes de energia e sendo o seu aproveitamento inesgotável numa escala temporal humana, este é, então, uma das alternativas energéticas mais promissoras, nomeadamente no campo de energias renováveis, ditas limpas. Verifica-se, ainda, que o Sol está desde sempre ligado à vida humana, às comunidades. As habitações eram construídas tendo em conta o ciclo solar, otimizando entre outros, o efeito térmico (PortalSolar, 2020).

### 3.2 Energia Solar Fotovoltaica

Os sistemas fotovoltaicos não utilizam o calor para produzir eletricidade. Interpretando a palavra “fotovoltaico”, “photo” significa produzido pela luz e o sufixo “voltaico” refere-se à eletricidade produzida por uma reação química. Assim, a tecnologia fotovoltaica permite converter diretamente a energia solar em energia elétrica, utilizando, normalmente, o silício como material conversor, possuindo um elevado grau de fiabilidade da energia elétrica produzida. Essa tecnologia é limpa, não polui e não emite gases com efeito estufa, sendo assim, uma forma de produção de energia elétrica isenta de poluição, se excluir os impactos ambientais provocados pelo processo de fabricação e destruição das células (DESIDERI et al., 2013; PITZ-PAAL, 2017; WEINSTEIN et al., 2015).

Em alguns países, tais como Índia e Holanda, estão a optar por utilizar painéis fotovoltaicos ao lado das estradas e “caminhos-de-ferro” como barreiras acústicas, contribuindo assim para a redução do impacto ambiental global. Empresas das mais



diversas áreas usam os painéis fotovoltaicos como telhado para parque de estacionamento para a sua frota de veículos, conforme apresenta a Figura 3.2.

Figura 3.2 – Parque de estacionamento na empresa portuguesa ProduCanelas.



Fonte: Elaboração própria.

Os sistemas fotovoltaicos encontram-se divididos em aplicações de pequena potência (décimas ou unidades de *quillowatt*) e aplicações de média potência (dezenas ou centenas de *quillowatt*). As aplicações de pequena potência encontram-se em relógios, calculadoras, sinalização marítima, sinais rodoviários, parquímetros, telefones de emergência, transmissores de TV e de celular ou geladeiras médicas em locais remotos. Por sua vez, as aplicações de média potência dizem respeito à eletrificação rural, no bombeamento de água, irrigação, abastecimento cargas domésticas em locais remotos sem rede e como complemento de abastecimento em locais remotos com ou sem rede.

Nas aplicações de média potência, os painéis fotovoltaicos podem ser utilizados principalmente de três formas:

- Sistemas ligados à rede de distribuição: estes sistemas utilizam um grande número de painéis fotovoltaicos, conforme se verifica na Figura 3.3, e não utilizam armazenamento de energia porque toda a produção é entregue diretamente à rede elétrica, através de um inversor que serve de elemento de interface entre o painel e a rede. Esses inversores devem satisfazer os requisitos de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada.

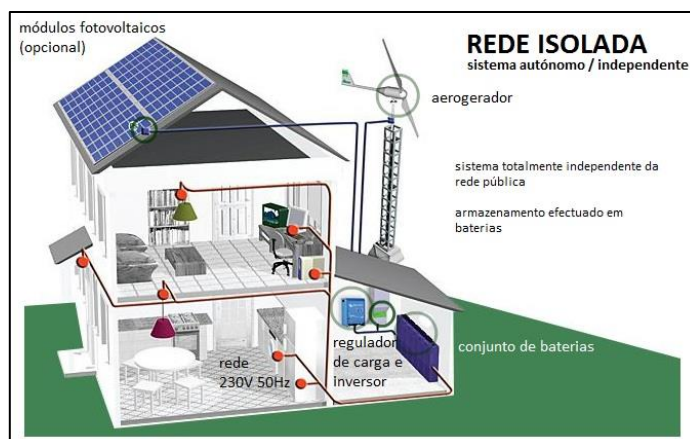
Figura 3.3 – Exemplo de um sistema ligado à rede de distribuição CEPRN – NATAL.



Fonte: Elaboração própria.

• **Sistemas híbridos:** alimentam normalmente sistemas autônomos em conjunto com outras fontes de energias renováveis, por exemplo, a eólica. É necessário um controle de todas as fontes para que exista grande eficiência. Esses sistemas têm alguma capacidade de armazenamento de energia, no entanto, pode ser necessário um meio de produção convencional, por exemplo, gerador a diesel servindo de apoio ou reserva. Os sistemas híbridos (Figura 3.4) conseguem alimentar um sistema isolado com um índice de fiabilidade comparável às redes convencionais.

Figura 3.4 – Exemplo de um sistema híbrido.



Fonte: Sol Vento Energia (2019).

• **Sistemas isolados:** os sistemas isolados ou autônomos para geração de energia solar fotovoltaica são caracterizados por não se conectar à rede elétrica. O sistema abastece diretamente os aparelhos que utilizarão a energia e são geralmente construídos com um propósito local e específico. Essa solução (Figura 3.5) é bastante utilizada em locais remotos, já que muitas vezes é o modo mais econômico e prático de se obter energia elétrica nesses lugares. Exemplos de uso são sistemas de

bombeamento de água, eletrificação de cercas, geladeiras para armazenar vacinas, postes de luz, estações replicadoras de sinal, etc (Portal Solar, 2020).

Figura 3.5 – Exemplo de um sistema isolado.



Fonte: Elaboração própria.

A energia produzida é armazenada em baterias que garantem o abastecimento em períodos sem sol. Os sistemas isolados de geração de energia solar fotovoltaica, de maneira simplificada, são compostos de quatro componentes (NEOSOLAR, 2019):

- Painéis/placas solares: são o coração do sistema e geram a energia elétrica que abastece as baterias. Tem a propriedade de transformar a radiação solar em corrente elétrica contínua. Um sistema pode ter apenas um painel ou vários painéis interligados entre si.

- Controladores de carga: são a válvula do coração e garantem o correto abastecimento das baterias, evitando sobrecargas e descargas profundas e aumentando sua vida útil.

- Inversores: são o cérebro do sistema e tem a função de transformar corrente contínua (CC) em corrente alternada (AC) e levar a tensão, por exemplo, de 12V para 127V. Em alguns casos pode ser ligado a outro tipo de gerador ou à própria rede elétrica para abastecer as baterias.

- Baterias: são o pulmão do sistema e armazenam a energia elétrica para ser utilizada nos momentos em que o Sol não esteja presente e não haja outras fontes de energia.

Em determinadas aplicações, os sistemas fotovoltaicos são mais vantajosos do que outros sistemas de produção de energia, nomeadamente nas aplicações de pequena potência, onde a sua difusão é mais significativa. Outras vantagens desses sistemas são conhecidas como: a ausência de poluição, cheiros ou ruídos, bem como

uma baixa manutenção; o caráter portátil e o poder de adaptação dos módulos permitem montagens simples e adaptáveis às várias necessidades energéticas; funcionam em operação contínua, não precisando de procedimentos de ativação; a resistência do revestimento da superfície, permitindo que as células fotovoltaicas não sejam afetadas nem por alterações de temperatura nem por vibrações, oferecendo em média cerca de 25 anos de garantia (Portal Solar, 2020; Neosolar, 2020).

Contudo, existem algumas desvantagens:

- A fabricação dos módulos fotovoltaicos é feita com base numa tecnologia sofisticada de elevado investimento;
- Quando é necessário efetuar armazenamento de energia através de baterias, o preço do sistema fotovoltaico tornar-se ainda mais elevado;
- O seu rendimento depende do índice de radiação, temperatura, quantidade de nuvens, entre outros fatores;
- O rendimento real da conversão de um módulo é reduzido, face ao custo de investimento.

### **3.3 Energia Heliotérmica de Concentração**

A energia solar térmica é uma fonte de energia renovável que permite o aproveitamento da energia do Sol sob forma de calor para aquecimento de água, secagem de produtos e produção de energia através de processo termodinâmico. Assim sendo, a produção de eletricidade a partir da energia solar também pode ser feita por conversão térmica, não apenas por via fotovoltaica (LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012; KOST; FLATH; MÖST, 2013; PITCHUMANI, 2019; MOHAMMADI, 2019; KHORASANIZADEH, 2019).

Essa tecnologia utiliza-se de sistemas que concentram a radiação incidente numa cavidade absorvedora e aquecem a alta temperatura, um fluido (ar, água, óleo térmico) que pode ser utilizado num ciclo termodinâmico convencional, inteiramente análogo ao que se faz nas centrais termoelétricas convencionais a combustíveis fósseis. A utilização dessa forma de energia implica saber captá-la e armazená-la. O nível de desenvolvimento dos equipamentos e componentes, tanto em relação aos coletores quanto aos outros elementos que constituem o sistema, tem sido grandioso nos últimos anos (MOHAMMADI, 2019; KHORASANIZADEH, 2019).

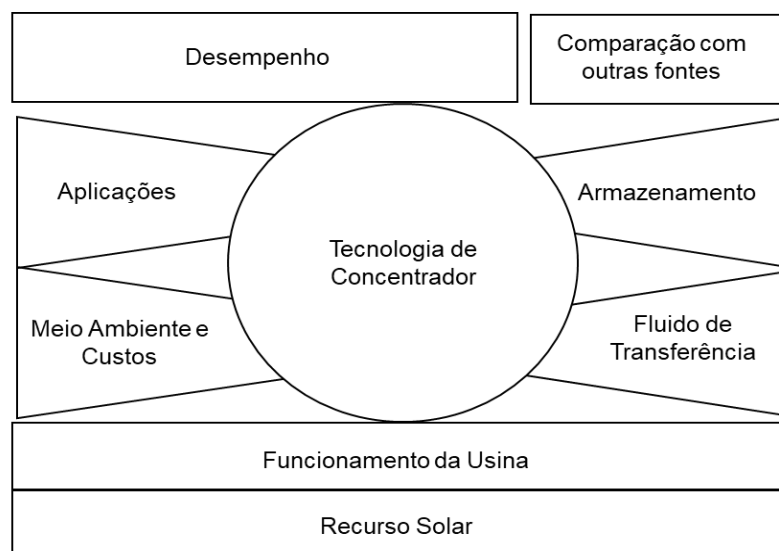
Há mais de duas décadas que na Espanha, em conjunto com a Alemanha e Estados Unidos, foram feitos esforços significativos para o desenvolvimento dessa tecnologia, culminando com o envolvimento de várias grandes empresas do setor, tais como ACCIONA, AMPERE ENERGY, EDP e outras, em torno da entidade CIEMAT (Centro de Investigações Energéticas, Meio-ambientais e Tecnológicas) e da sua Plataforma Solar de Almería. As principais apostas incidiram sobre as centrais de coletores cilindro-parabólicos, centrais de torre solar e centrais de discos parabólicos com motores do tipo Stirling (LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012; KOST; FLATH; MÖST, 2013; PITCHUMANI, 2019; MOHAMMADI, 2019; KHORASANIZADEH, 2019).

### 3.3.1 Modelo conceitual da Energia Solar Heliotérmica

#### 3.3.1.1 *Framework* do funcionamento de uma Usina Heliotérmica

A partir da análise do referencial teórico levantado foi possível compreender as tecnologias e condições necessárias para funcionamento de uma usina solar heliotérmica. Com isso, foi elaborado a Figura 3.6 que representa o funcionamento de uma usina heliotérmica.

Figura 3.6 – *Framework* funcionamento de uma usina Heliotérmica.



Fonte: Elaboração Própria.

Primeiramente, na base da Figura 3.6 tem-se o recurso solar, que é a condição primária de uma usina, pois para que uma usina gere eletricidade é necessário que haja um nível adequado de radiação no local, sendo necessário conhecê-lo antes de fazer qualquer outra análise no local pretendido para instalação.

A parte central da Figura 3.6 está posicionado as tecnologias de concentrador, em que é englobado o refletor e o absorvedor da usina. Existem 4 tipos de tecnologia de concentrador: a calha parabólica, os refletores de Fresnel, a torre solar e o prato parabólico. A determinação da escolha da tecnologia de concentrador irá influenciar todas as características e as demais tecnologias da usina, pois os concentradores possuem diferentes compatibilidades com as demais tecnologias e determina as outras partes demonstradas na Figura 3.6.

O lado direito da Figura 3.6 tem-se duas tecnologias que podem ou não ter em uma usina de geração de energia heliotérmica, que são o armazenamento térmico e os fluidos de transferência. Mesmo assim, a maioria das usinas possuem ambas as tecnologias e, além disso, deve haver uma compatibilidade entre elas.

O lado esquerdo da Figura 3.6 apresenta-se as características das usinas. Na parte abaixo há o impacto ambiental que a empresa promove e os custos. Na parte de cima há as possíveis aplicações do trabalho feito pela usina.

Já o topo da Figura 3.6 representa o resultado do trabalho da usina e o desempenho que ela possui, que está diretamente dependente do tipo de ciclo termodinâmico que a turbina da usina utiliza. E ainda, há a comparação das características da geração de energia heliotérmica com outras fontes renováveis.

### **Dimensão 1: Funcionamento da usina**

O princípio de funcionamento de uma usina de energia solar heliotérmica é baseado na conversão de energia solar em energia térmica, depois em energia mecânica e, em seguida, em energia elétrica (ADINBERG, 2011; COCCO; SERRA, 2015; KOST; FLATH; MÖST, 2013; BEHAR; KHELLAF; MOHAMMEDI, 2013). Esses processos de conversão são feitos por meio da concentração dos raios solares em um receptor e o direcionamento da radiação solar é feito a um conjunto de espelhos direcionado a um foco (COCCO; SERRA, 2015; BAI; SUN; LIU, 2018; LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012; XIAO et al., 2017; YASINSKIY et al., 2018; VIGNAROUBAN et al., 2015b; LIU et al., 2015; CORONA et al., 2016; BEHAR; KHELLAF; MOHAMMEDI, 2013; LI et al., 2017; SAIT et al., 2015; PITZ-PAAL, 2017; DESAI; BANDYOPADHYAY, 2015b; DAMERAU et al., 2011; BAHAROON et al., 2014; GAUCHÉ; BRENT; VON BACKSTRÖM, 2014; PIETZCKER et al., 2014).

Nesse foco a temperatura está alta por conta da concentração dos raios, em que os receptores absorvem a energia térmica por fluidos de transferência de calor (COCCO; SERRA, 2015; BAI; SUN; LIU, 2018; LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012; YASINSKIY et al., 2018; VIGNAROOBAN et al., 2015b). Os fluidos transportam o calor pela usina por meio de tubos e são responsáveis pela movimentação cíclica do fluido (BAI; SUN; LIU, 2018; LIU et al., 2017; XIAO et al., 2017; CORONA et al., 2016; UMMADISINGU; SONI, 2011).

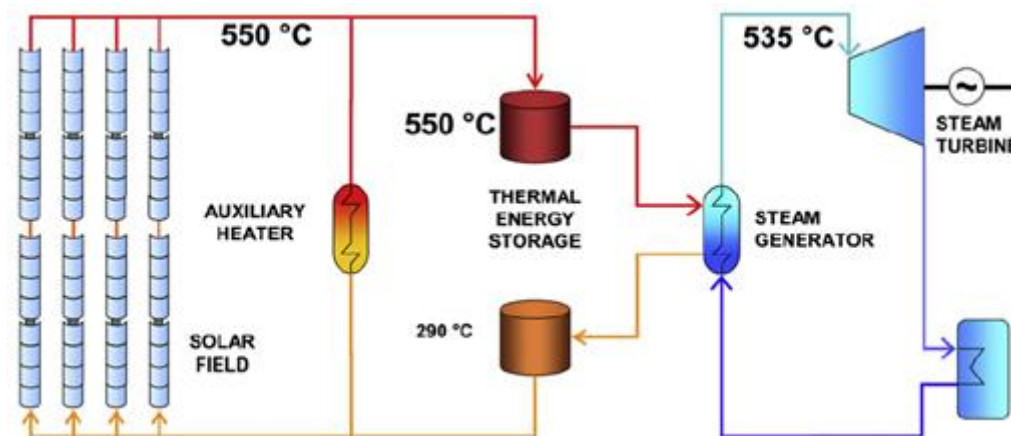
O calor absorvido pelo fluido possui dois destinos, que dependendo da usina, pode ser levado para o campo de geração de energia ou para o campo de armazenamento (ADINBERG, 2011; LI et al., 2017; KOST; FLATH; MÖST, 2013; VIGNAROOBAN et al., 2015a; PENG; ROOT; MARAVELIAS, 2017). No campo de geração de energia o fluido transfere a energia térmica para que seja produzido vapor (ADINBERG, 2011; LIU et al., 2017; LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012; LIU et al., 2015; CORONA et al., 2016; LI et al., 2017). Esse vapor é responsável por rotacionar uma turbina e por meio do trabalho mecânico dela, baseado em um ciclo termodinâmico, é possível gerar eletricidade (LIU et al., 2017; XIAO et al., 2017; ZHU; KEARNEY; MEHOS, 2014; LIU et al., 2015; PITCHUMANI, 2014; SAIT et al., 2015; PIETZCKER et al., 2014).

Já no campo de armazenamento, o calor também será absorvido, dessa vez por um tanque quente que servirá para armazenar a energia térmica (ADINBERG, 2011; GAUCHÉ; BRENT; VON BACKSTRÖM, 2014; KURAVI et al., 2013; KOST; FLATH; MÖST, 2013; PIETZCKER et al., 2014). Essa energia será utilizada em momentos de necessidade, por exemplo, após o pôr do sol, quando o calor é necessário, o tanque quente libera o calor para o fluido de transferência e, este, se encaminhará para o campo de geração de energia (ADINBERG, 2011; GHOBITY et al., 2011; LI et al., 2017; PITCHUMANI, 2014; PIETZCKER et al., 2014).

Ambos os fluidos que tiveram o calor absorvido pelo campo de geração de energia e pelo campo de armazenamento ficam em um estágio frio e são direcionados para o campo solar, para absorver o calor concentrado pelos receptores (DESAI; BANDYOPADHYAY, 2015b; BAHAROON et al., 2014; AMATO et al., 2011). Dessa forma, fecha-se o ciclo percorrido do fluido de transferência na usina de energia solar heliotérmica.

A Figura 3.7 é uma representação de uma usina heliotérmica, onde é possível entender o fluxo de energia percorrido durante o processo de geração de energia elétrica.

Figura 3.7 – Esquema de funcionamento de uma Usina CSP.



Fonte: NREL (2018).

Para analisar melhor a usina, ela pode ser dividida em 4 partes: o campo solar, o campo de armazenamento, o campo de geração de energia e a transferência de energia. As partes das usinas devem ser compatíveis entre si e são interligadas por tubos em que circulam fluidos de transferência de energia. O Quadro 3.2 apresenta uma caracterização de cada parte da usina.



Quadro 3.2 – Caracterização de cada parte da usina.

Tipo	Autor	Caracterização
Campo Solar	(BAHAROON et al., 2014), (GAUCHÉ; BRENT; VON BACKSTRÖM, 2014), (KOST; FLATH; MÖST, 2013), (ZHAO et al., 2017), (VIGNAROOBAN et al., 2015a), (PENG; ROOT; MARAVELLAS, 2017), (PIETZCKER et al., 2014), (HO, 2014)	O campo solar é responsável por captar a energia solar e converter em energia térmica de altas temperaturas. Para isso, utiliza-se da ótica refletiva de espelhos para direcionar os raios solares a um receptor que irá absorver o calor. Os espelhos possuem um sistema de rastreamento para acompanhar a movimentação diária do sol para maximizar a quantidade de sol refletida.
Transferência de energia	(AMATO et al., 2011), (BAHAROON et al., 2014), (DESIDERI et al., 2013), (MADAENI; SIOSHANSI; DENHOLM, 2013), (KOST; FLATH; MÖST, 2013), (VIGNAROOBAN et al., 2015a), (PENG; ROOT; MARAVELLAS, 2017), (NITHYANANDAM; PITCHUMANI, 2014), (LI et al., 2017), (BATUECAS et al., 2017), (GHOBEITY et al., 2011), (COCCO; SERRA, 2015), (AMATO et al., 2011), (BAHAROON et al., 2014), (GAUCHÉ; BRENT; VON BACKSTRÖM, 2014), (DESIDERI et al., 2013), (KOST; FLATH; MÖST, 2013), (ZHAO et al., 2017), (NITHYANANDAM; PITCHUMANI, 2014), (LI et al., 2017), (SAIT et al., 2015), (PIETZCKER et al., 2014),	A transferência de calor da usina é feita por meio de um sistema de tubulação que contém fluidos capazes de absorver e liberar energia térmica. Com isso, o calor absorvido no campo solar é transferido para o powerblock e para o campo de armazenamento.
Campo de Geração de energia	(BAHAROON et al., 2014), (GAUCHÉ; BRENT; VON BACKSTRÖM, 2014), (DESIDERI et al., 2013), (KOST; FLATH; MÖST, 2013), (ZHAO et al., 2017), (NITHYANANDAM; PITCHUMANI, 2014), (LI et al., 2017), (SAIT et al., 2015), (PIETZCKER et al., 2014),	O powerblock é responsável pela conversão termoelétrica, isso ocorre por meio da rotação de turbinas a vapor, com base em um ciclo termodinâmico.
Campo de armazenamento	(GAUCHÉ; BRENT; VON BACKSTRÖM, 2014); (KURAVI et al., 2013); (KOST; FLATH; MÖST, 2013); (ZHAO et al., 2017); (NITHYANANDAM; PITCHUMANI, 2014); (PIETZCKER et al., 2014); (GHOBEITY et al., 2011), (LIU et al., 2015)	O campo de armazenamento é responsável por armazenar energia térmica excedente para utilização em outro momento, possibilitando uma geração de eletricidade estável e contínua, controlando as variações no fluxo de produção. A energia é armazenada em tanques térmicos e liberada por meio da troca de calor com fluidos de transferência de calor.

Fonte: Elaboração própria.

## Dimensão 2: Recurso Solar

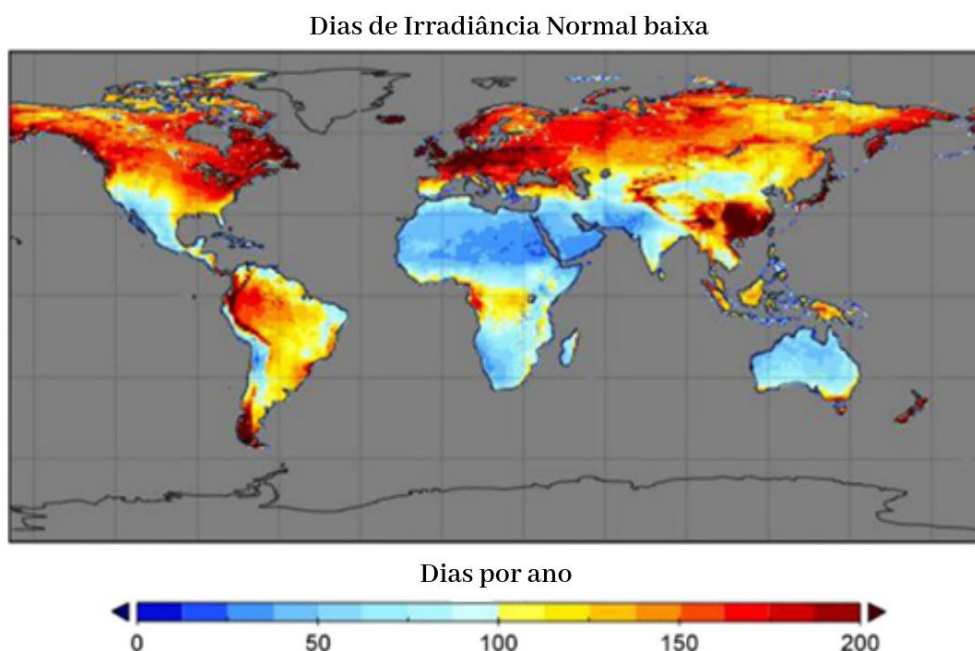
Para o funcionamento de uma usina de energia heliotérmica, é necessário que o local tenha índices de radiação adequados, onde no caso desse tipo de tecnologia, deve ser considerado apenas o componente direto da radiação solar, desconsiderando o componente difuso. As regiões desérticas e áridas são, portanto, as mais adequadas para receber esse tipo de tecnologia, pois possuem alta Irradiância Normal Direta – DNI (MEHOS; KABEL; SMITHERS, 2009; PITZ-PAAL, 2017; LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012).

O DNI é um importante índice para a escolha dos locais, influenciando na viabilidade econômica da implementação de uma usina CSP, no qual representa a quantidade de energia solar por unidade de área incidente do coletor durante 1 ano (MEHOS; KABEL; SMITHERS, 2009; DESAI; KEDARE; BANDYOPADHYAY, 2014; BURKHARDT; HEATH; COHEN, 2012). O custo e o desempenho das tecnologias dependem muito do número de dias com DNI baixo e a irradiância média nos dias de operação (ZHANG et al., 2013).

O local onde a usina CSP é instalada deve ter DNI de pelo menos 2000 kWh/m<sup>2</sup>/ano para ser considerado comercialmente viável, com as usinas existentes já atendendo a essa exigência (ISLAM et al., 2018; UMMADISINGU; SONI, 2011; BURKHARDT; HEATH; COHEN, 2012).

Na Figura 3.8 é possível observar os locais em potencial para construção das usinas, onde as regiões em azul são aquelas que passam menos dias com DNI abaixo de 3000 kWh/m<sup>2</sup>/ano. O norte da África, o Oriente Médio, o Mediterrâneo, parte dos Estados Unidos e México são conhecidos como “Cinturão do Sol”, por possuírem altos DNIs e poucos dias com radiação baixa durante o ano (ISLAM et al., 2018; LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012; ZHANG et al., 2013).

Figura 3.8 – Estimativa do número de dias em que o DNI cai abaixo de 3000 W/m<sup>2</sup>.



Fonte: Adaptado de ZHANG et al. (2013).

### 3.3.1.2: Tecnologia de Concentrador

A tecnologia de concentração de energia solar é responsável por refletir os raios solares e concentrar em um ponto de absorção, sendo o primeiro sistema de coleta de energia da usina, ou seja, é o ponto de captação da energia (HO, 2014; ZHAO et al., 2017; BAHAROON et al., 2014; GAUCHÉ; BRENT; VON BACKSTRÖM, 2014; PIETZCKER et al., 2014). O sistema é composto pelo refletor e pelo receptor, no qual o primeiro é um conjunto de espelhos que refletem e concentram a radiação

solar em um determinado foco, sendo este o receptor (HO, 2014; ZHAO et al., 2017; BAHAROON et al., 2014; GAUCHÉ; BRENT; VON BACKSTRÖM, 2014; PIETZCKER et al., 2014). O receptor absorve a energia concentrada e a converte em energia térmica, produzindo calor a temperaturas elevadas, podendo chegar a 1.000°C (BAHAROON et al., 2014; GAUCHÉ; BRENT; VON BACKSTRÖM, 2014; PIETZCKER et al., 2014).

Existem quatro tipos de tecnologia de concentrador: a calha parabólica, os refletores de Fresnel, a torre solar e o prato parabólico. Cada um desses sistemas possuem um refletor e um receptor específico. O Quadro 3.3 apresenta a caracterização de cada uma dessas tecnologias.

Quadro 3.3 – Caracterização de cada uma das tecnologias de concentrador.

Tipo	Autor	Definição
Calha Parabólica	(BAHAROON et al., 2014); (BAI; SUN; LIU, 2018); (ISLAM et al., 2018); (RAVI KUMAR; REDDY, 2012); (UMMADISINGU; SONI, 2011); (BRAUN et al., 2011); (BURKHARDT; HEATH; TURCHI, 2011)	As calhas parabólicas são espelhos rastreadores com superfície parabólica, em forma de "U" gigante, possuem um foco em um receptor linear, um tubo conectado ao concentrador, movimentando-se juntamente. Os espelhos possuem um eixo norte-sul, para acompanhar a movimentação diária do sol e são posicionados em linhas paralelas no campo solar.
Refletores de Fresnel	(BAHAROON et al., 2014); (BAI; SUN; LIU, 2018); (ISLAM et al., 2018); (RAVI KUMAR; REDDY, 2012); (UMMADISINGU; SONI, 2011); (BRAUN et al., 2011); (MONTES et al., 2014)	Os refletores de Fresnel são um conjunto de espelhos longos planos ou curvos separados, assemelham-se a uma parábola quebrada, e cada espelho possui movimentação individual, e se comportam como lentes de Fresnel. Os espelhos possuem um eixo norte-sul, e cada um se movimenta de forma que direcione os raios solares adequadamente ao receptor linear que é um tubo estacionário.
Torre Solar	(BAHAROON et al., 2014); (PITZ-PAAL, 2017); (BAI; SUN; LIU, 2018); (ISLAM et al., 2018); (UMMADISINGU; SONI, 2011); (BRAUN et al., 2011); (NITHYANANDAM; PITCHUMANI, 2014); (MODI et al., 2016); (BEHAR; KHELLAF; MOHAMMEDI, 2013)	A torre solar é o receptor que absorve a energia solar direcionada pelos heliostátos, posicionada de maneira que todos os heliostátos direcionem os raios solares para a torre. Os heliostátos são um conjunto de espelhos individuais e planos de dois eixos (norte-sul e leste-oeste) que se movimenta para se adequar ao movimento diário do sol e o receptor é um foco pontual e estacionário, posicionado na torre.
Prato Parabólico	(BAHAROON et al., 2014); (ISLAM et al., 2018); (UMMADISINGU; SONI, 2011); (BRAUN et al., 2011)	O prato parabólico são espelhos individuais em formato de prato que possuem dois eixos (norte-sul e leste-oeste) e seu receptor é um o foco pontual em uma micro-turbina ou em um motor Stirling. O prato e o motor se movem conjuntamente para se adequar a posição diária do sol.

Fonte: Elaboração própria.

Os sistemas de concentração podem ser classificados com base na geometria focal, podendo ter um foco pontual ou um foco linear (GHOBEITY et al., 2011; UMMADISINGU; SONI, 2011; YASINSKIY et al., 2018; WEINSTEIN, 2015). Os sistemas com foco pontual, a torre solar e o prato parabólico direcionam os raios solares em um ponto específico, com um receptor de menor extensão, e seus receptores possuem uma rotação em dois eixos em seus espelhos, podendo se movimentar Norte-Sul, Leste-Oeste, para que assim seja aumentada a eficiência no

direcionamento dos raios (UMMADISINGU; SONI, 2011; BAI; SUN; LIU, 2018; YASINSKIY et al., 2018; WEINSTEIN, 2015; BAHAROON et al., 2014; HAMED et al., 2016).

Os sistemas de foco linear, a calha parabólica e os refletores de Fresnel podem ser representados por tubos, tem uma maior extensão e os refletores possuem apenas a rotação em um eixo, Leste-Oeste (UMMADISINGU; SONI, 2011; BAI; SUN; LIU, 2018; YASINSKIY et al., 2018; WEINSTEIN, 2015; BAHAROON et al., 2014; HAMED et al., 2016). Os sistemas pontuais possuem uma eficiência maior, porém apresentam um alto custo e baixa escalabilidade, ao contrário de sistemas lineares, com baixos custos, baixa eficiência e alta escalabilidade (UMMADISINGU; SONI, 2011; WEINSTEIN, 2015; BAHAROON et al., 2014; HAMED et al., 2016).

Um fator de relevância para o desempenho da usina é a eficiência térmica proporcionada pelos refletores, pois são os responsáveis por captar a energia inicial para o funcionamento da usina (HU et al., 2013; ZHU; KEARNEY; MEHOS, 2014). Dessa forma, o desempenho projetado do campo solar é baseado na refletância média proporcionada pelos espelhos (ZHU; KEARNEY; MEHOS, 2014).

Dado isso, analisa-se a importância da escolha de espelhos com materiais adequados que proporcionem altos níveis de refletância (BUTEL et al., 2012). Os espelhos mais comuns para concentração de calor são de espelhos de vidro com verso prateado, que possuem a estabilidade mecânica e química do vidro aliado a alta refletância da prata, além do vidro ser um material de baixo custo, quando produzido em alto volume (BUTEL et al., 2012). Há ainda outros metais utilizados para fabricação de espelhos, sendo os mais utilizados o alumínio (Al) e a prata (Ag) (BUTEL et al., 2012).

#### a) Calha Parabólica

A calha parabólica é uma tecnologia de concentrador composta por um espelho em formato de "U" e um receptor linear acoplado ao refletor, em que se movimentam com um eixo Leste-Oeste para acompanhar a movimentação diária do sol (BAHAROON et al., 2014; BAI; SUN; LIU, 2018; ISLAM et al., 2018; RAVI KUMAR; REDDY, 2012; UMMADISINGU; SONI, 2011; BRAUN et al., 2011; WEINSTEIN, 2015; PIETZCKER et al., 2014; LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012; ZHANG et al., 2013).

Os espelhos ficam posicionados no campo solar em fileiras paralelas aliados com o eixo Norte-Sul, para poderem se movimentar adequadamente durante o dia, acompanhando o nascer do sol no Leste e o pôr do sol no Oeste (BAHAROON et al., 2014; BAI; SUN; LIU, 2018; ISLAM et al., 2018; RAVI KUMAR; REDDY, 2012; UMMADISINGU; SONI, 2011; WEINSTEIN, 2015; ZHANG et al., 2013).

A calha parabólica utiliza como fluido de transferência o óleo térmico, o sal fundido e a água, sendo o mais utilizado o óleo térmico, com temperaturas alcançando variações de 350°C a 550°C, com eficiência solar-elétrica de 15% (BAHAROON et al., 2014; ISLAM et al., 2018; UMMADISINGU; SONI, 2011; WEINSTEIN, 2015; WANG et al., 2017). Essa tecnologia é considerada a mais madura e mais utilizada dentre as usinas no mundo (BAI; SUN; LIU, 2018; HINKLEY et al., 2013; BAHAROON et al., 2014).

A Figura 3.9 representa um campo solar de uma usina heliotérmica com a tecnologia de calha parabólica, em que se permite visualizar o arranjo físico da usina e o formato dos refletores e receptores.

Figura 3.9 – Foto de usina heliotérmica com calha parabólica.



Fonte: Mehos, Kabel e Smithers (2009).

#### b) Refletores de Fresnel

Os refletores de Fresnel são espelhos planos separados que se configuram em formato de uma parábola facetada, havendo espaços entre os espelhos (BAI; SUN; LIU, 2018; ISLAM et al., 2018; RAVI KUMAR; REDDY, 2012; UMMADISINGU; SONI,

2011; WEINSTEIN, 2015; MONTES et al., 2014). Esses refletores direcionam os raios solares a um receptor em formato de tubo linear estacionário e possuem uma configuração de apenas um eixo Leste-Oeste, para acompanhar a movimentação diária do sol (BAHAROON et al., 2014; BAI; SUN; LIU, 2018; ISLAM et al., 2018; RAVI KUMAR; REDDY, 2012; UMMADISINGU; SONI, 2011; BRAUN et al., 2011; WEINSTEIN, 2015; MONTES et al., 2014). Os fluidos de transferência compatíveis com a tecnologia são o óleo térmico, o sal fundido e a água (BAHAROON et al., 2014; BAI; SUN; LIU, 2018).

Por ser uma parábola facetada permite que haja perdas de eficiência em relação a calha parabólica e estima-se cerca de 8% a 10% de eficiência solar-elétrica (ISLAM et al., 2018; UMMADISINGU; SONI, 2011). Porém, por ter um receptor estacionário, diminui a complexidade e os custos da tecnologia, tendo ainda uma redução do uso da terra (MERINO et al., 2018; VIGNAROOBAN et al., 2015b; BAI; SUN; LIU, 2018).

Esse tipo de tecnologia ainda está em estudo e não é muito utilizada em usinas heliotérmicas (VIGNAROOBAN et al., 2015b), pois o custo de implementação é muito alto para a eficiência que apresenta e a área necessária para tornar o projeto viável em termos de potência/eficiência se torna muito grande. A Figura 3.10 representa um campo solar de usina heliotérmica com a tecnologia de refletores de Fresnel, em que se permite visualizar o arranjo físico da usina e o formato dos refletores e receptores.

Figura 3.10 – Foto de usina heliotérmica com lentes Fresnel.



Fonte: Islam et al. (2018).

### c) Torre Solar

A torre solar é composta por heliostáto e por uma torre central com um receptor. Os heliostátos são um conjunto de espelhos que se movimentam de acordo com o

posicionamento do Sol e direcionam os raios solares ao receptor (BAHAROON et al., 2014; PITZ-PAAL, 2017; BAI; SUN; LIU, 2018; ISLAM et al., 2018; UMMADISINGU; SONI, 2011; NITHYANANDAM; PITCHUMANI, 2014; MODI et al., 2016; WEINSTEIN, 2015; BEHAR; KHELLAF; MOHAMMEDI, 2013; PIETZCKER et al., 2014; LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012).

No caso dessa tecnologia, os espelhos possuem 2 eixos, Norte-Sul e Leste-Oeste, o receptor é estacionário e pontual e é compatível com a água, o sal fundido e o óleo térmico, como fluidos de transferência (BAHAROON et al., 2014; BAI; SUN; LIU, 2018; ISLAM et al., 2018; BRAUN et al., 2011; MODI et al., 2016; WEINSTEIN, 2015; BEHAR; KHELLAF; MOHAMMEDI, 2013).

Esse tipo de tecnologia pode alcançar temperaturas até 1.000°C, considerada a mais elevada comparado aos demais tipos de tecnologia de concentrador (BAHAROON et al., 2014; PIETZCKER et al., 2014; BEHAR; KHELLAF; MOHAMMEDI, 2013; PITZ-PAAL, 2017; LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012; VIGNAROOBAN et al., 2015b). Essa característica é a principal razão para a tendência mundial de instalação de usinas com a tecnologia de torre solar, acarretando eficiência solar-elétrica de 25% a 30% e capacidade de 200 MW (UMMADISINGU; SONI, 2011; ISLAM et al., 2018; VIGNAROOBAN et al., 2015a; TOPEL; LAUMERT, 2018). A principal desvantagem da torre solar é o alto custo de investimento inicial e a necessidade de terra em grande escala (VIGNAROOBAN et al., 2015a; XU et al., 2016; BAHAROON et al., 2014; TOPEL; LAUMERT, 2018).

A Figura 3.11 representa um campo solar de uma usina heliotérmica com a tecnologia de torre solar, em que se permite visualizar o arranjo físico da usina e o formato dos refletores e receptores.

Figura 3.11 – Foto de usina heliotérmica com torre solar configuração.



Fonte: Islam et al. (2018).

#### d) Motores Stirling

A tecnologia Motores Stirling é composta por um refletor em formato de prato acoplado a um receptor pontual que possui uma miniturbina, em que a conversão em energia elétrica ocorre também nesse sistema de concentrador (BAHAROON et al., 2014; ISLAM et al., 2018; UMMADISINGU; SONI, 2011; BRAUN et al., 2011; WEINSTEIN, 2015).

O prato parabólico possui dois eixos, Norte-Sul e Leste-Oeste, que se adequam melhor ao posicionamento do Sol, fazendo com que a eficiência solar-elétrica seja elevada, estimada entre 25% e 30%, conseguindo alcançar temperaturas entre 700°C e 750°C (BAHAROON et al., 2014; ISLAM et al., 2018; UMMADISINGU; SONI, 2011; BRAUN et al., 2011; WEINSTEIN, 2015).

Esse tipo de tecnologia possui a vantagem de conseguir se adequar a terrenos irregulares e não necessitam de uma grande extensão de terra, além de possuírem baixo consumo de água (BAHAROON et al., 2014; UMMADISINGU; SONI, 2011). Porém, como desvantagem, tem a impossibilidade de acoplar um sistema de armazenamento térmico em seu sistema (BAHAROON et al., 2014; TRAINER, 2014).

A Figura 3.12 representa um campo solar de uma usina heliotérmica com a tecnologia Motores Stirling, em que se permite visualizar o arranjo físico da usina e o formato dos refletores e receptores.



Figura 3.12 – Foto de usina heliotérmica com Motores Stirling.



Fonte: Mehos, Kabel e Smithers (2009).

### 3.3.1.3 Condições para instalação das usinas

Para a tomada de decisão da implementação de uma usina heliotérmica, vários tópicos devem-se ser levados em consideração:

#### a) Meio Ambiente

O aspecto ambiental acarretado pela geração de energia por meio de uma usina heliotérmica é um importante fator a ser analisado. A geração solar é considerada uma energia limpa, porém não é livre de impactos ambientais nas fases do processo (RAVI KUMAR; REDDY, 2012; YASINSKIY et al., 2018).

Avaliações do ciclo de vida da usina analisam não só o funcionamento da usina, mas também os impactos causados na instalação, conforme apresentados no Quadro 3.4, no processo de produção dos componentes da usina, na operação e manutenção da usina, no descomissionamento e na eliminação dos resíduos (RAVI KUMAR; REDDY, 2012).

Quadro 3.4 – Impactos Ambientais.

<b>IMPACTOS AMBIENTAIS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissão de gases do efeito estufa</li> <li>• Poluição visual</li> <li>• Uso de materiais inflamáveis</li> <li>• Alteração da topografia</li> <li>• Aplicação de herbicidas</li> <li>• Alteração da fauna e da flora</li> <li>• Poluição sonora</li> <li>• Consumo de água</li> </ul>

Fonte: Trieb, Fichter e Moser [s.d.].

A emissão de gases do efeito estufa de uma usina heliotérmica - principalmente de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) – ocorre devido aos processos secundários, o processo de fabricação dos componentes, a produção do fluido de transferência, a operação de manutenção e o consumo de energia para os sistemas (BURKHARDT; HEATH; TURCHI, 2011; XU et al., 2016). Mesmo assim, a quantidade de emissão ainda é 500 a 1.000 vezes menor que as emissões de usinas termoelétricas similares (XU et al., 2016; TRIEB; FICHTER; MOSER, [s.d.]).

Outro fator relevante que podem trazer impactos ao ambiente é o uso de materiais inflamáveis no processo, que trazem riscos de explosões e requer cuidados no manuseio e uso dos produtos, nos quais são utilizados, principalmente, para a transferência de calor na usina (XU et al., 2016; TRIEB; FICHTER; MOSER, [s.d.]; MERINO et al., 2018). Outro impacto importante é a poluição sonora gerada por ruídos da turbina, do resfriamento e outros processos (TRIEB; FICHTER; MOSER, [s.d.]; MERINO et al., 2018).

Quanto a fauna local, ela é afetada devido a radiação solar refletida pelos espelhos, onde esses raios concentrados impactam as aves próximas a usina, causando queimaduras por conta das altas temperaturas (XU et al., 2016). Porém, ainda é um número menor comparado a morte de aves por colisão em janelas, veículos e linhas de transmissão (XU et al., 2016). Além disso, os raios solares também podem afetar aeronaves, caso os espelhos estejam mal posicionados (XU et al., 2016).

Na instalação do campo solar é necessário a terraplanagem da área e aplicação de herbicidas, gerando uma modificação do solo e afetando a fauna e flora local (MERINO et al., 2018). Além disso, o uso da terra já implica em impactos na fauna e flora (TRIEB; FICHTER; MOSER, [s.d.]).

Um dos impactos mais relevantes é o consumo de água das usinas, onde o *powerblock* consome em média 3,5L/kWh de água (XU et al., 2016). A água é necessária, principalmente, para o resfriamento da turbina e para a lavagem dos espelhos (XU et al., 2016; DAMERAU et al., 2011; MERINO et al., 2018). O problema do uso da água se agrava devido à localização ideal das usinas heliotérmicas, pois as usinas heliotérmicas estão presentes em regiões áridas, com pouca disponibilidade de água, aumentando a necessidade do uso racional dela (XU et al., 2016).

Para isso, surgem soluções como o resfriamento a seco, com tipos alternativos como: condensador refrigerado a ar, canais subterrâneos, resfriamento indireto do ciclo de Heller com torres de resfriamento a seco, resfriamento radiativo e outros métodos que estão sendo pesquisados (XU et al., 2016; DAMERAU et al., 2011; MERINO et al., 2018; DYRESON; MILLER, 2016). Uma usina com resfriamento úmido necessita de 3.000m<sup>3</sup>/GWh, em comparação com o resfriamento a seco, que utiliza dez vezes menos volume de água, e estima-se 300m<sup>3</sup>/GWh, ambos já incluindo a limpeza dos espelhos (LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012).

#### b) Área necessária

A geração de eletricidade das usinas heliotérmicas está diretamente ligada com o tamanho do campo solar que possuem, pois, o tamanho e a configuração do campo solar irão definir a quantidade de energia solar que será concentrada no receptor e, assim, definirá a quantidade de eletricidade produzida (COCCO; SERRA, 2015; LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012; KOST; FLATH; MÖST, 2013). Além disso, o fato dessas usinas terem um custo inicial alto, forçam elas a possuir potências altas para tornar a instalação viável (COCCO; SERRA, 2015).

Assim, com a necessidade da geração de energia em grande escala, as usinas heliotérmicas requerem a disponibilidade de áreas extensas estimadas em torno de 150 a 250 hectares, sendo considerada o *powerblock*, o campo de armazenamento e o campo solar, onde há necessidade de ser projetado de acordo com o número, a

largura, a distância dos refletores e os espaços livres entre eles (COCCO; SERRA, 2015).

A escolha da tecnologia de concentrador irá influenciar a quantidade de terra necessária. A calha parabólica e os refletores de Fresnel necessitam de áreas menores em comparação com o prato parabólico e a torre solar, em que para ambas se estima 8 a 12 m<sup>2</sup>/MWh/ano, para a calha parabólica entre 6 e 8 m<sup>2</sup>/MWh/ano e para os refletores de Fresnel entre 4 e 6 m<sup>2</sup>/MWh/ano (ISLAM et al., 2018).

### c) Custos da usina

A usina heliotérmica possui vantagens superiores a outras fontes de energia, porém seu custo ainda não é competitivo frente a fontes convencionais e sua implantação depende de subsídios para se tornar viável (WEINSTEIN et al., 2015; LIU et al., 2015; HERNÁNDEZ-MORO; MARTÍNEZ-DUART, 2011). Isso torna a necessidade de redução dos custos imprescindível para o futuro (HERNÁNDEZ-MORO; MARTÍNEZ-DUART, 2011).

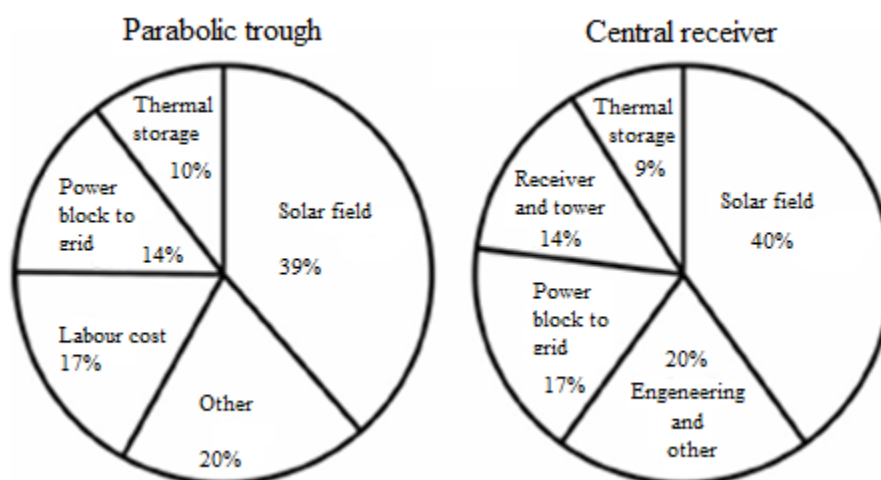
A redução dos custos da usina heliotérmica está alinhada com o desenvolvimento de tecnologias que melhoram a eficiência global, onde umas das possíveis melhorias é o aumento da temperatura absorvida pelo fluido de transferência, para que seja elevado a eficiência no *powerblock* (PITZ-PAAL, 2017). Outro ponto de melhoria é no armazenamento de energia, no desenvolvimento de tecnologias mais eficientes, quanto a quantidade e ao tempo de armazenamento da energia (PITZ-PAAL, 2017; SHEPPARD et al., [s.d.]).

O custo mais relevante é o investimento inicial das usinas, pois os custos com operação e manutenção são menores e a energia utilizada na usina advém da própria geração (LIU et al., 2015; SAIT et al., 2015; MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2011). Dentro do custo de investimento, o campo solar compreende a maior parte, pois é composto por muitos espelhos de alta tecnologia. Porém, para redução de custos existe a possibilidade do aprimoramento tecnológico dessa parte da usina, a fim de torná-los mais baratos ou mais eficientes (PITZ-PAAL, 2017; MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2011).

Como os custos variam de acordo com a tecnologia de concentrador definida, a Figura 3.13 mostra a distribuição dos custos para uma usina com calha parabólica

e para uma usina com torre solar. Em ambas o campo solar é o que depreende de maiores custos, 39% e 40%, respectivamente.

Figura 3.13 – Distribuição dos custos para usinas com calha parabólica e com torre solar.



Fonte: Kolb et al. (2011).

#### d) Fluido de transferência

A energia solar térmica absorvida nos receptores é transmitida para um fluido de calor (HTF), tendo a função de coletar, transportar e trocar calor com o ciclo de energia através de um trocador de calor (BATUECAS et al., 2017; WEINSTEIN et al., 2015; XU et al., 2016). Apesar de não ser estritamente necessário (WEINSTEIN et al., 2015), o HTF desempenha uma função importante para o desempenho e eficiência dos sistemas atualmente em operação (LIU et al., 2017; ZHANG et al., 2017a; VIGNAROOBAN et al., 2015b).

Além disso, é possível ainda que os HTFs realizem a função secundária de armazenar energia ao incorporar um sistema de armazenamento térmico de energia (TES) para obter geração de eletricidade, mesmo sem a luz do dia (XU et al., 2016; VIGNAROOBAN et al., 2015a).

As características ideais para o HTF são: (1) Baixo ponto de fusão, ou seja, ele precisa se manter fluido mesmo na parte mais fria do ciclo solar, evitando o congelamento (MCFARLANE et al., 2014; BATUECAS et al., 2017); (2) Alto ponto de ebulição e estabilidade térmica para operar durante anos com o mínimo de reposição (XU et al., 2016; MCFARLANE et al., 2014); (3) Baixa pressão de vapor em altas temperaturas (VIGNAROOBAN et al., 2015a; BATUECAS et al., 2017; MCFARLANE et al., 2014); (4) Compatibilidade com os materiais de contenção. Em temperaturas

altas, a corrosão das ligas metálicas usadas nos tubos que transportam o HTF é agravada e, portanto, o fluido precisa ser quimicamente inerte na faixa de temperatura de operação (KURAVI et al., 2013; XU et al., 2016; VIGNAROOBAN et al., 2015a; VIGNAROOBAN et al., 2014); (5) Baixa viscosidade para minimizar a potência de bombeamento necessária (WEINSTEIN et al., 2015; XU et al., 2016); (6) Alta condutividade térmica para a transferência de calor do absorvedor para o bloco de energia de forma eficiente (WEINSTEIN et al., 2015; XU et al., 2016); (7) Alta densidade e capacidade de calor específico para armazenamento de energia, permitindo alto fluxo de calor com baixa taxa de fluxo de massa e também para reduzir o tamanho dos tanques de armazenamento (WEINSTEIN et al., 2015; XU et al., 2016; XIONG et al., 2016); (8) Baixo custo, tornando possível sua aplicação prática (XU et al., 2016; VIGNAROOBAN et al., 2015a).

Vários tipos de HTF como óleos térmicos, sais fundidos, água/vapor e ar são usados em plantas comerciais (XU et al., 2016). O Quadro 3.5 apresenta os fluidos de transferência de calor mais utilizados, os principais tipos e suas características.

Quadro 3.5 – Características dos vários fluidos de transferência.

Tipo	Características	Autores
Óleos	Boa estabilidade, baixo ponto de congelamento, temperatura de operação máxima de 400°C, caros, inflamáveis.	(COCCO; SERRA, 2015), (BAI; SUN; LIU, 2018), (WEINSTEIN et al., 2015), (KENDA et al., 2017), (XU et al., 2016), (VIGNAROOBAN et al., 2015b), (MCFARLANE et al., 2014)
Sais Fundidos	Temperatura de operação de mais de 500°C, mais eficiente, temperatura alta de congelamento, boa estabilidade térmica e química, baixo custo, boas propriedades térmicas, podem ser corrosivos.	(AMATO et al., 2011) (BAI; SUN; LIU, 2018) (WEINSTEIN et al., 2015) (LIU et al., 2017) (FLEMING et al., 2017) (BATUECAS et al., 2017) (DESAI; KEDARE; BANDYOPADHYAY, 2014) (ZHANG et al., 2017a) (XIONG et al., 2016) (VIGNAROOBAN et al., 2015b) (MCFARLANE et al., 2014)
Água/Vapor	Alta eficiência, baixa viscosidade, baixas propriedades corrosivas, baixa condutividade térmica, alto consumo de água.	(BAI; SUN; LIU, 2018), (XU et al., 2016), (VIGNAROOBAN et al., 2015b)
Metais líquidos	Faixa de temperatura de operação extensa, baixa viscosidade, boa condutividade térmica, caros, capacidade térmica baixa.	(VIGNAROOBAN et al., 2015b)

Gases	Ótimo custo-benefício, alta eficiência, baixas propriedades corrosivas, condutividade térmica baixa.	(WEINSTEIN et al., 2015), (CORGNALÉ et al., 2016), (XU et al., 2016), (VIGNAROOBAN et al., 2015b)
Nanofluidos	Boa condutividade térmica e eficiência.	(GÓMEZ-VILLAREJO et al., 2017), (MCFARLANE et al., 2014), (MARTÍN et al., 2018)

Fonte: Elaboração Própria.

Os óleos minerais, de silicone e sintéticos são muito utilizados como HTF nas usinas CSP devido a sua estabilidade em uma faixa de temperatura relativamente grande e seu baixo ponto de congelamento (WEINSTEIN et al., 2015; VIGNAROOBAN et al., 2015b). Eles são líquidos em condições ambientais e tem baixa viscosidade, o que reduz a potência de bombeamento (WEINSTEIN et al., 2015).

Sua limitação, porém, está na baixa temperatura de operação, atingindo um máximo de apenas 400°C e, por isso, não são geralmente utilizados em sistemas de alta temperatura e alta eficiência (BAI; SUN; LIU, 2018; ZEYGHAMI; KHALILI, 2015; VIGNAROOBAN et al., 2015b). Além disso, são muito caros (cerca de 3 a 5\$/kg) e apresentam condutividade térmica próxima a de outros HTFs como o vapor, por exemplo (XU et al., 2016; VIGNAROOBAN et al., 2015b). Os óleos demandam maior espaço de armazenamento, pois possuem menor densidade e capacidade térmica, em comparação à sais fundidos. Outro ponto negativo é a inflamabilidade e toxicidade desses materiais (WEINSTEIN et al., 2015).

Os óleos sintéticos têm maior condutividade e menor viscosidade, além de menos inflamáveis, sendo geralmente preferidos em relação aos minerais (WEINSTEIN et al., 2015). O Therminol® é um exemplo de óleo sintético bastante empregado, contém óxido bifenílico e difenílico, ambos derivados do benzeno, com ponto de congelamento de 12°C (BATUECAS et al., 2017; KENDA et al., 2017). Kenda et al. (2017) realizaram uma pesquisa utilizando óleo cru de pinhão-manso (JaCCO) como HTF, comparando-o aos óleos comumente utilizados. O JaCCO é um óleo vegetal típico da África Ocidental, apresenta boas propriedades e baixo custo, tornando-o um atraente e inovador HTF quando comparado aos óleos utilizados.

A maioria das usinas CSP atuais incorporaram sistemas de armazenamento de energia para operar por várias horas quando o Sol se põe e, para isso, muitas pesquisas para melhorar os materiais utilizados como HTF e armazenamento foram desenvolvidas (LIU et al., 2015).

Os sais fundidos apresentam boa vantagem para essa combinação quando comparado aos demais (LIU et al., 2017; BATUECAS et al., 2017; VIGNAROOBAN et al., 2015b). Esses fluidos apresentam temperatura de trabalho mais alta (mais de 500°C), permitindo operações com maior eficiência (BAI; SUN; LIU, 2018; FLEMING et al., 2017; DESAI; KEDARE; BANDYOPADHYAY, 2014). No entanto, a temperatura precisa ser mantida acima de 290°C para que não haja congelamento nos tubos de transporte. Portanto, os sais fundidos são adequados apenas para sistemas de alta temperatura como o de torre central (BAI; SUN; LIU, 2018; LIM et al., 2017).

Outros fatores positivos dos sais incluem excelente estabilidade térmica e química, grande capacidade térmica, baixo custo, alta densidade, baixa pressão de vapor e propriedade corrosiva, boas propriedades térmicas e físicas em temperaturas elevadas (ZHANG et al., 2017a; BATUECAS et al., 2017; XIONG et al., 2016; VIGNAROOBAN et al., 2015b).

Por outro lado, desafios associados à fusão dos sais e a maior potência de bombeamento são apontados por Weinstein et al. (2015). Como dito anteriormente, o ponto de fusão dos sais é alto, resultando em problemas de solidificação nos tubos de transferência (XIONG et al., 2016). Além disso, os sais fundidos agravam o problema associado a corrosão das ligas utilizadas nos tubos e contêineres (VIGNAROOBAN et al., 2015b).

Os sais de nitratos são comumente usados como HTF nos sistemas de torre central e calha parabólica. Além de mais baratos, são muito menos corrosivos que os fluoretos e cloretos (ZHANG et al., 2017a; BATUECAS et al., 2017). Os sais de cloreto possuem estabilidade térmica e preço baixo, mas apresentam ação corrosiva aguda. Os fluoretos possuem limites de temperatura mais elevados, porém maior expansão volumétrica na transformação de fase (LIU et al., 2017; ZHANG et al., 2017a).

Além dos sais fundidos, os metais líquidos também se apresentam como fortes candidatos a HTF em usinas de alta temperatura. Eles têm baixa pressão de vapor, alta condutividade térmica, viscosidade relativamente baixa e ampla faixa de



temperatura de operação (700 a 1.000°C). Os custos desses materiais são mais altos do que os sais fundidos, além da capacidade térmica mais baixa, dificultando o uso como material de armazenamento (VIGNAROOBAN et al., 2015b; WEINSTEIN et al., 2015).

Ao utilizar água como HTF, não há necessidade de grandes equipamentos responsáveis pela transferência de calor para a geração de vapor e consequente movimento das turbinas, em que o próprio fluido de calor exerce esse papel. Sendo assim, o vapor possui as vantagens de não oferecer riscos de incêndio, tem maior eficiência devido à simplificação do sistema ao não utilizar trocadores de calor, baixa viscosidade a alta temperatura, alta capacidade específica de calor e baixas propriedades corrosivas (BAI; SUN; LIU, 2018; XU et al., 2016).

Os principais pontos negativos associados a esse HTF incluem a alta pressão para bombear uma mistura de suas fases, a baixa condutividade térmica e a necessidade de água, pois essas plantas, normalmente, estão localizadas em regiões áridas (WEINSTEIN et al., 2015; VIGNAROOBAN et al., 2015b).

A utilização do ar como HTF, boas propriedades de fluxo nas tubulações são alcançadas, além de um ótimo custo-benefício e alta eficiência por causa de sua abundância. A corrosão de ligas em altas temperaturas também não apresenta problemas, porém sua condutividade térmica é relativamente baixa (XU et al., 2016; VIGNAROOBAN et al., 2015b).

O Hélio apresenta alta temperatura de operação, apesar de apresentar baixa capacidade de calor e necessidade de altas pressões (VIGNAROOBAN et al., 2015b). O CO<sub>2</sub> é outro gás que pode ser utilizado em altas temperaturas, mas o mesmo deve ser operado em sistemas fechados, utilizando tubos mais espessos e medidas preventivas de vazamento (VIGNAROOBAN et al., 2015b; WEINSTEIN et al., 2015).

Ao suspender nanopartículas em um HTF, suas propriedades como condutividade térmica e coeficiente de transferência de calor são melhoradas, aumentando a eficiência do HTF utilizado como fluido de base (MARTÍN et al., 2018; GÓMEZ-VILLAREJO et al., 2017). No entanto, essa ainda é uma área pouco explorada dos materiais utilizados como HTF.

#### e) Armazenamento térmico

Uma das principais limitações da energia solar é a instabilidade e a intermitência da geração de energia e isso ocorre devido à característica intrínseca aos recursos naturais de serem variáveis (ADINBERG, 2011; MEHOS; KABEL; SMITHERS, 2009; SHABGARD et al., 2012; MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2011; ORTIZ et al., 2018). Em períodos noturnos ou períodos com condições meteorológicas desfavorável não é possível absorver o calor provindo da radiação do sol e, dessa forma, não é possível gerar eletricidade (ADINBERG, 2011; MEHOS; KABEL; SMITHERS, 2009; DESIDERI et al., 2013).

Esse fator causa um descompasso entre a oferta e a demanda de energia, causa flutuações no fornecimento de eletricidade e torna a energia solar não-confiável, pois não se consegue produzir quando é necessário e, sim, quando é possível (ADINBERG, 2011; FLUECKIGER; GARIMELLA, 2014; DOMINGUEZ; BARINGO; CONEJO, 2012; ZHAO et al., 2017).

Uma das formas de solução dessa limitação é o uso de armazenamento de energia térmica no sistema, que possibilita o armazenamento do calor por meio dos fluidos de transferência e, a medida em que é necessário o calor, pode ser liberado para ser convertido em eletricidade no *powerblock* (ADINBERG, 2011; MEHOS; KABEL; SMITHERS, 2009; MADAENI; SIOSHANSI; DENHOLM, 2011; KURAVI et al., 2013; PITZ-PAAL, 2017; BAHAROON et al., 2014).

Para o armazenamento térmico compor o sistema da usina é preciso que a capacidade de absorção de energia seja suficientemente alta para suprir o *powerblock* e o armazenamento (ADINBERG, 2011). Assim, parte da energia captada será levada direto ao *powerblock*, onde será transformada em eletricidade, e a outra parte será levada ao campo de armazenamento (LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012; ADINBERG, 2011; PITZ-PAAL, 2017).

Com o armazenamento de calor, a geração de eletricidade passa a ser independente do Sol, ou seja, é possível gerar eletricidade durante períodos nublados e durante a noite (ADINBERG, 2011; DESIDERI et al., 2013; MADAENI; SIOSHANSI; DENHOLM, 2011; PITZ-PAAL, 2017; LUECKIGER; GARIMELLA, 2014; DOMINGUEZ; BARINGO; CONEJO, 2012; ZHAO et al., 2017; SHABGARD et al., 2012; PENG; ROOT; MARAVELIAS, 2017; MAO et al., 2015; MANENTI; RAVAGHI-

ARDEBILI, 2013; LIU et al., 2015; BAHAROON et al., 2014). Assim, durante dias ensolarados ou períodos de pico, o calor é armazenado podendo ser utilizado sob demanda, em um momento posterior, e, dessa forma, a produção é dissociada ao Sol, mitigando os problemas pela falta de recurso solar (MEHOS; KABEL; SMITHERS, 2009; DESIDERI et al., 2013; PITZ-PAAL, 2017; FLUECKIGER; GARIMELLA, 2014; ZHAO et al., 2017; SHABGARD et al., 2012; MAO et al., 2015).

Outra vantagem do armazenamento térmico é o custo comparado as demais formas de armazenamento de energia (químico e mecânico), pois não é preciso passar por processo de conversão, como ocorre em usinas de energia solar fotovoltaica (GAUCHÉ; BRENT; VON BACKSTRÖM, 2014; MADAENI; SIOSHANSI; DENHOLM, 2013; KURAVI et al., 2013; PITZ-PAAL, 2017; WU et al., 2016; MAO, 2016). Nesse caso, o calor, que é armazenado, servirá de insumo para as turbinas. Com a implantação em uma usina heliotérmica, os custos da usina diminuem devido a melhoria da eficiência, pois são balanceados tanto a demanda quanto a oferta de energia (GAUCHÉ; BRENT; VON BACKSTRÖM, 2014; SHABGARD et al., 2012; ROBAK; BERGMAN; FAGHRI, 2011; BAHAROON et al., 2014).

O sistema de armazenamento térmico é composto por três partes: o meio de armazenamento, o mecanismo de transferência e o sistema de contenção. O meio de armazenamento é a forma como o calor será armazenado, podendo ser por meio de calor sensível, variando a temperatura do material, através do calor latente, que varia a fase do material, ou por meio de uma reação termoquímica reversível (KURAVI et al., 2013; XU et al., 2016; MAO, 2016).

O mecanismo de transferência é a forma com que será transferido o calor do campo de armazenamento para o *powerblock*, sendo classificado como sistema de armazenamento direto ou indireto, em que o direto, o fluido de transferência de calor também pode ser o fluido de armazenamento de calor e, o indireto, os materiais são diferentes entre o fluido de transferência e o fluido de armazenamento. Por fim, o sistema de contenção é o meio que está contido o armazenamento, podendo ser com um ou dois tanques, passivo ou ativo (KURAVI et al., 2013; XU et al., 2016; MAO, 2016).

O Quadro 3.6 apresenta a caracterização dos três meios de armazenamento de calor utilizados em usinas heliotérmicas.

Quadro 3.6 – Caracterização dos três meios de armazenamento de calor utilizados em usinas heliotérmicas.

Tipo	Autor	Caracterização
Calor sensível	(WEINSTEIN et al., 2015), (KURAVI et al., 2013), (XU et al., 2016), (LIU et al., 2015)	O calor sensível armazena energia por meio do aumento da temperatura do meio, que pode ser sólido ou líquido. Durante o aumento da temperatura, a fase do material não é alterada. A capacidade de armazenamento irá depender da capacidade específica de calor do material e da variação de temperatura.
Calor latente	(WEINSTEIN et al., 2015), (KURAVI et al., 2013), (XU et al., 2016), (ROBAK; BERGMAN; FAGHRI, 2011), (NITHYANANDAM; PITCHUMANI, 2013)	O calor latente armazena energia por meio da variação da fase do material, beneficiando-se da variação de entalpia associada a transição de fase. É um processo quase isotérmico e comumente se utiliza do calor da fusão para o processo, mudança de sólido-líquido.
Calor termoquímico	(WEINSTEIN et al., 2015), (KURAVI et al., 2013), (PENG; ROOT; MARAVELIAS, 2017), (ORTIZ et al., 2018), (LIU et al., 2015)	O calor termoquímico armazena o calor por meio de uma reação termoquímica reversível, que ao armazenar é endotérmica e para liberar o calor a reação é exotérmica.

Fonte: Elaboração Própria.

O calor sensível é o mais utilizado nas usinas heliotérmicas, pois é o meio mais simples devido à facilidade de transferência de calor para o sistema (KURAVI et al., 2013; COCCO; SERRA, 2015; WEINSTEIN et al., 2015). Contudo, possui a menor densidade de armazenamento e por isso precisa de grandes tanques para armazenar o material. Além disso, o material utilizado possui o risco potencial de solidificação, caso a temperatura diminua até o ponto de solidificação do material (ROBAK; BERGMAN; FAGHRI, 2011; WEINSTEIN et al., 2015). O material mais utilizado para esse tipo de armazenamento são os sais de nitrato e pode ser acrescido concreto, rocha, areia e metais (KURAVI et al., 2013).

O calor latente possui uma densidade de armazenamento maior em comparação com a do calor sensível, necessitando de tanques menores e, com isso, ocorre diminuição dos custos (SHABGARD et al., 2012; LIU et al., 2015; ROBAK; BERGMAN; FAGHRI, 2011). Porém, a principal desvantagem desse tipo de armazenamento é a resistência térmica entre o meio de armazenamento e o fluido de transferência, devido à baixa condutividade térmica (ROBAK; BERGMAN; FAGHRI, 2011; XU et al., 2016; LIU et al., 2015; NITHYANANDAM; PITCHUMANI, 2014; NITHYANANDAM; PITCHUMANI, 2013).

Quanto ao calor termoquímico, refere-se ao que oferece maior potencial de densidade de armazenamento, consegue armazenar maior quantidade de energia, por mais tempo, e trabalha-se em uma temperatura constante, evitando o auto aquecimento (ORTIZ et al., 2018; PENG; ROOT; MARAVELIAS, 2017; WEINSTEIN et al., 2015; KURAVI et al., 2013). Porém esse sistema ainda está em fase de desenvolvimento, onde estudos são feitos com hidretos a base de Mg, de Ti e de Ca (LIU et al., 2015; ORTIZ et al., 2018; PENG; ROOT; MARAVELIAS, 2017; KURAVI et al., 2013; WEINSTEIN et al., 2015; CORGNALÉ et al., 2016).

Os sistemas de contenção de armazenamento térmico são apresentados no Quadro 3.7. Esses sistemas podem ser ativo ou passivo, em que o ativo é quando o meio de armazenamento é apenas líquido (KURAVI et al., 2013; ALONSO et al., 2017), e o armazenamento passivo utiliza materiais sólidos baratos, como rochas, areia ou concreto, para armazenar o calor e, assim, melhorar a eficiência do armazenamento (KURAVI et al., 2013; ALONSO et al., 2017).

Quadro 3.7 – Sistemas de contenção do armazenamento térmico.

Sistema de Contenção	Autor	Caracterização
Dois Tanques	(COCCO; SERRA, 2015), (WEINSTEIN et al., 2015), (KURAVI et al., 2013), (FLUECKIGER; GARIMELLA, 2014), (XU et al., 2016), (PY et al., [s.d.])	O sistema de dois tanques possui um tanque “quente”, com material carregado de energia, e um tanque “frio”, com a energia já liberada para o sistema.
Termoclina	(COCCO; SERRA, 2015), (WEINSTEIN et al., 2015), (MADAENI; SIOSHANSI; DENHOLM, 2011), (KURAVI et al., 2013), (JU et al., 2015), (BURKHARDT; HEATH; TURCHI, 2011), (FLUECKIGER; GARIMELLA, 2014), (XU et al., 2016), (PY et al., [s.d.]), (LIU et al., 2015)	O sistema termoclina é um tanque que possui parte do fluido quente e parte frio, separados por um gradiente térmico. O fluido quente está presente na parte de cima e o fluido frio localiza-se na parte de baixo, devido às suas características de densidade.

Fonte: Elaboração Própria.

Os sistemas de dois tanques possuem um tanque quente e outro frio. Quando o campo solar absorve energia, parte dela é armazenada pelo tanque quente; quando é a energia, o fluido do tanque quente é liberado e se direciona ao *powerblock* para transferir o calor. Após isso, o fluido, agora frio, volta ao campo de armazenamento, para o tanque frio, onde espera até o momento de ir para o campo solar receber energia e voltar ao tanque quente (COCCO; SERRA, 2015; PENG; ROOT;

MARAVELIAS, 2017; LIU et al., 2015; MADAENI; SIOSHANSI; DENHOLM, 2013; MADAENI; SIOSHANSI; DENHOLM, 2011).

Esse é o processo de funcionamento de dois tanques diretos, quando o fluido de transferência do sistema é igual ao fluido de armazenamento. No sistema indireto, ocorre quando há diferença, os tanques irão utilizar outro tipo de material e, durante o carregamento e a liberação de calor, ocorre um processo de troca de energia entre os fluidos. O sistema indireto é menos eficiente e mais caro devido a necessidade de transferência de energia entre os fluidos, porém é necessário para as usinas em que o fluido de transferência utilizado não é adequado para ser armazenado (LIU et al., 2015; XU et al., 2016; MADAENI; SIOSHANSI; DENHOLM, 2013; MADAENI; SIOSHANSI; DENHOLM, 2011).

O sistema termoclina comporta fluidos com diferença de temperatura com um gradiente térmico separando os fluidos. Quando o armazenamento é carregado há o aumento de fluido quente e diminuição do fluido frio, ocasionado a descida do gradiente térmico. Já quando a energia é liberada, a quantidade de fluido quente passa a ser menor que a quantidade de fluido frio, ocasionado a subida do gradiente térmico (COCCO; SERRA, 2015; JU et al., 2015). Esse sistema possui um menor volume e um menor custo em comparação com o sistema de dois tanques, porém é menos eficiente (SAEED et al., 2016; COCCO; SERRA, 2015; WEINSTEIN et al., 2015; MADAENI; SIOSHANSI; DENHOLM, 2011; FLUECKIGER; GARIMELLA, 2014).

O armazenamento térmico escolhido para uma usina heliotérmica irá depender da configuração global da usina, analisando qual tecnologia de concentrador escolhida, qual fluido de transferência a ser utilizado, para, então, escolher um sistema de armazenamento compatível. O sistema de armazenamento se configura pela escolha do meio de armazenamento (calor sensível, latente ou termoquímico), o fluido utilizado (direto ou indireto), o sistema de contenção, definindo se é passivo ou ativo, e se terá um ou dois tanques (KURAVI et al., 2013).

#### f) Aplicações

O consumo insustentável de energia, as emissões de gases de efeito estufa e o impacto ambiental gerado pelos setores comerciais e industriais têm elevado significativamente o interesse em utilizar a energia solar dentro desses sistemas. A

viabilidade de aplicações solares em indústrias como a de alimentos, mineração, materiais de construção civil, estão sendo bastante estudados. A produção de cal, por exemplo, pode utilizar a concentração solar na calcinação, assim como a produção de zinco, de alumínio e sua reciclagem, sendo todos esses processos promissores aplicações da CSP (ALONSO et al., 2017; STUBER, 2018; MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2011).

Além da aplicação em processos industriais, duas grandes opções são muito atraentes para os estudos da tecnologia CSP: a possibilidade de integrar uma usina de concentração a outro tipo de energia – hibridização – e utilizar o calor/vapor sobressalente gerado – dessalinização, secagem, dessecação, etc. Neste trabalho, são abordadas brevemente as aplicações mais destacadas na literatura: a hibridização e a dessalinização (ALONSO et al., 2017; STUBER, 2018; MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2011).

#### 1) Hibridização

Além do armazenamento de energia, o sistema de hibridização mantém o fornecimento de eletricidade quando a radiação solar é baixa ou não está disponível, o que torna essa tecnologia atraente se comparadas com outras fontes de energia solar. Esse componente de *backup* auxiliar tem baixo custo e pode diminuir os problemas com interrupções, garantindo maior confiabilidade no sistema (ZHANG et al., 2013; HINKLEY et al., 2013; MANENTE; RECH; LAZZARETTO, 2016).

Os sistemas híbridos de CSP e combustíveis fósseis são os mais aplicados atualmente, apresentam baixo custo, além de aumentar a eficiência em comparação aos sistemas sem hibridização (LIM et al., 2017; PETERSEIM et al., 2014; ANGELINO; INVERNIZZI, 2008). A maioria dessas usinas usam um componente acionado a gás natural para dar a partida e estabilizar a geração de eletricidade e operações de emergência. Ainda, algumas usinas de combustíveis fósseis utilizam um componente CSP para fornecer vapor adicional (PETERSEIM et al., 2014).

Han et al. (2017) apresenta um sistema de hibridização utilizando a tecnologia fotovoltaica (PV) no receptor de um sistema CSP e, como resultado, conseguiu-se aumentar a taxa de utilização da energia solar, podendo a eficiência energética chegar a cerca de 20% a mais, em comparação ao sistema fotovoltaico individualmente.

A usina Stillwater foi a primeira a utilizar a energia geotérmica e a CSP juntas. Apesar de apresentarem alto custo de instalação, se combinadas, elas podem partilhar equipamentos e melhorar significativamente a eficiência e o investimento (PETERSEIM et al., 2014; MCTIGUE et al., 2018). Mctigue et al. (2018) propõe em sua pesquisa uma maneira eficaz de integrar os dois sistemas, mostrando que muitas usinas geotérmicas poderiam se beneficiar da adição de calor solar para aumentar sua produção.

Outras combinações como CSP/Eólica e CSP/Biomassa também foram encontradas na literatura, mas pouco exploradas. A energia eólica tem maior produção no período noturno, apresenta uma ótima opção para combinar com a CSP, que tem sua maior produção realizada no período diurno.

## 2) Dessalinização

Outra opção muito atraente de aplicação do vapor gerado na usina CSP é sua utilização para dessalinizar a água do mar. Essa combinação gera energia de forma sustentável e produz água potável a um baixo custo, reduzindo os problemas relacionados à escassez de água. A região do MENA (Oriente Médio e Norte da África), por exemplo, tem grande necessidade de água doce e como possui acesso favorável a água do Mar Mediterrâneo, seria muito beneficiada com essa tecnologia. Com apenas algumas instalações comerciais operando na Líbia e no Iémen, a cogeração de energia e água dessalinizada é um conceito recente e precisa ser mais estudado e melhorado (PALENZUELA et al., 2015; IAQUANIELLO et al., 2014; HOFFMANN; DALL, 2018; GHOBEITY et al., 2011; XU et al., 2016).

Na Espanha, a plataforma solar de Almeria de dessalinização conectou um campo de coletores parabólicos para diminuir os custos com energia da usina, resultando em uma redução de 27 kWh/m<sup>3</sup> no consumo de energia. No entanto, algumas questões ainda precisam ser resolvidas. Além da melhoria do conceito e integração da tecnologia, a localização da estação de dessalinização é um fator importante para a instalação, isso porque o DNI é geralmente mais baixo na costa, fazendo com que as construções CSP sejam instaladas mais no interior e fazendo-se necessário o bombeamento da água, o que resulta em um impacto significativo no custo (HAMED et al., 2016; PALENZUELA et al., 2015; HOFFMANN; DALL, 2018).



## g) Desempenho

A capacidade instalada das centrais CSP subiu rapidamente na última década. Em 2010, a energia acumulada instalada era de 1,08 GW, aumentando consideravelmente para 2,5 GW no final de 2012. Em 2015, a capacidade total já era de 5,8 GW em todo o mundo, sendo a Espanha e os Estados Unidos os líderes mundiais em CSP. Países como a Índia, Chile, China, África do Sul e Austrália foram atraídos pelas vantagens desse tipo de energia, com alguns tendo usinas em operação (LIU et al., 2015; HERNÁNDEZ-MORO; MARTÍNEZ-DUART, 2014).

Um estudo realizado em 2006 afirma que a capacidade será de 55 GW em 2050 nos Estados Unidos, cerca de 2,75% da capacidade total de geração do país (ZHANG et al., 2013; ZHU; KEARNEY; MEHOS, 2014). Algumas características relacionadas ao desempenho são descritas a seguir:

### 1) Capacidade, eficiência e potência

Alguns fatores podem interferir diretamente na capacidade de uma usina CSP. Os níveis variáveis de irradiância solar tem alto impacto na geração de energia e esse fator é agravado para sistemas sem armazenamento de energia térmica. Além disso, o tamanho do campo solar e a configuração selecionada (refletores, HTFs e armazenamento) definem o desempenho esperado pela usina (TOPEL; LAUMERT, 2018; TRIEB; FICHTER; MOSER, [s.d.]).

Nos dias atuais, as configurações mais selecionadas para construção são aquelas de grande geração de energia, geralmente na faixa de 20 a 50 MW, como é o caso da PTC, podendo chegar a 150 MW. Isso se deve a uma maior eficiência de conversão e menores custos de capital específicos (COCCO; SERRA, 2015).

A viabilidade e lucratividade dependem de uma capacidade mínima de produção. Para sistemas de torre central, por exemplo, são alcançadas quando a usina tem capacidade de 50 a 100 MW, sendo assim, imprescindível o aumento da eficiência de conversão de energia do sistema (ISLAM et al., 2018; MOON et al., 2015).

A eficiência depende de vários fatores como as características ópticas, a razão de concentração, a precisão do rastreamento, a limpeza, a condução de calor do HTF e, principalmente, por sua temperatura de operação (MOON et al., 2015). As

temperaturas mais altas permitem uma melhor conversão e melhoram a operação das turbinas (MCFARLANE et al., 2014; LIU et al., 2015).

Sendo assim, uma análise das perdas quantitativas e qualitativas de energia envolvidas em vários componentes do sistema se faz necessário, onde ao diminuir tais perdas, o desempenho geral da usina pode melhorar, pois aumenta sua eficiência (RAVI KUMAR; REDDY, 2012; MCFARLANE et al., 2014).

Em relação às configurações, os sistemas de torre e prato parabólico são os que apresentam maiores eficiências, pois tem altas taxas de concentração dos refletores e chegam a temperaturas muito altas. No entanto, a capacidade do prato parabólico é a mais baixa das tecnologias, variando entre 0,01 MW a 0,4 MW para cada prato parabólico individual. Dessa forma, para grande geração de energia, são necessárias grandes capacidades. O sistema de calha parabólica e Fresnel apresentam capacidade que variam de 10 a 200 MW e o sistema de torre apresenta capacidade de 10 a 150 MW e, portanto, são os mais utilizados (ISLAM et al., 2018; LIU et al., 2015).

## 2) Ciclo termodinâmico

Para gerar eletricidade, usinas heliotérmicas utilizam princípios de conversão de energia por meio de ciclos termodinâmicos, inicialmente de energia térmica para mecânica e, depois, de mecânica para elétrica, como as usinas de fontes convencionais (PITZ-PAAL, 2017; WEINSTEIN et al., 2015; KURAVI et al., 2013).

Primeiramente, o fluido de transferência transporta o calor absorvido até o campo de geração de energia útil, sendo o calor utilizado para movimentar uma turbina e transformado em energia mecânica e, por meio das turbinas que sofrem processos de variação de temperatura e pressão, é gerado eletricidade (DESIDERI et al., 2013; PITZ-PAAL, 2017; WEINSTEIN et al., 2015). Os ciclos termodinâmicos adequados a usinas heliotérmicas são os ciclos Rankine, Brayton e Stirling, sendo o ciclo Rankine o mais utilizado (XIAO et al., 2017; PITZ-PAAL, 2017).

O ciclo Rankine é o ciclo de vapor, que utiliza a água como fluido de trabalho, e esse vapor gerado irá movimentar a turbina com temperaturas em torno de 400 a 600°C (XIAO et al., 2017; DESAI; KEDARE; BANDYOPADHYAY, 2014). O ciclo Rankine também pode utilizar um fluido orgânico como fluido de trabalho, conhecido

como ciclo orgânico Rankine (XIAO et al., 2017; DESAI; KEDARE; BANDYOPADHYAY, 2014).

Esse ciclo pode ser representado em 4 etapas: a primeira, o fluido é comprimido a alta pressão; segundo, é aquecido por meio do calor absorvido; em seguida (terceiro), é expandido a baixa pressão, produzindo trabalho mecânico na turbina; e, por fim, quarto, o fluido é resfriado a temperatura inicial (WEINSTEIN et al., 2015; DESIDERI et al., 2013).

Geralmente, o ciclo de vapor utiliza resfriamento úmido que tem alta taxa de consumo de água, o que é um problema, uma vez que as áreas onde as usinas são implantadas não dispõem desse recurso. Consequentemente, um novo método de resfriamento a seco passou a ser implementado, onde se utiliza uma série de ventiladores em uma rede de trocadores de calor, e isso reduz consideravelmente o consumo de água, mas também reduz a eficiência, além de encarecer (cerca de 8%) (BURKHARDT; HEATH; TURCHI, 2011).

O ciclo Brayton (ciclo a gás), que requer temperaturas em torno de 600°C ou até 1.200°C, possui alta eficiência, pode atingir uma eficiência térmica de até 55%, necessita de menos água do que o Rankine, porém ainda está em desenvolvimento (CORGNALE et al., 2016; IVERSON et al., 2013; XIAO et al., 2017; PITZ-PAAL, 2017; NITHYANANDAM; PITCHUMANI, 2014; WANG et al., 2017a).

O ciclo Stirling utiliza fluidos compressíveis, como hélio e hidrogênio, necessita de temperaturas um pouco menores que os demais ciclos, em torno de 400 a 800°C, e é aconselhado para geração em pequena escala (até 10 kW) (XIAO et al., 2017; PITZ-PAAL, 2017). O Quadro 3.8 traz informações comparativas entre os ciclos termodinâmicos.

Quadro 3.8 – Potenciais ciclos térmicos.

Ciclo térmico	Mecanismos	Temperatura típica de calor residual (°C)	Potência térmica típica	Eficiência térmica típica	Meio de trabalho	Características
Ciclo Stirling	Mecanismo Stirling	400 – 800	1 – 100 kW	~ 40 %	Hélio, hidrogênio ou nitrogênio	Movimento recíproco de gás
Ciclo Rankine	Ciclo Orgânico Rankine	80 – 300	100 kW – 10 MW	~ 7- 20 %	Composto, orgânico, como	Fluido de trabalho com duas fases

					refrigerantes e hidrocarbonetos	
	Turbina de vapor	400 – 600	10 MW – 1 GW	~ 35 %	Água	
Ciclo Brayton	Ciclo supercrítico CO <sub>2</sub>	500 – 700	> 10 MW	~ 50 %	CO <sub>2</sub>	Fluido de trabalho com uma fase
	Turbina de gás	>800	5 kW – 100 kW 1 MW – 20 MW 100 MW – 500 MW	~ 30 %	Ar ou combustão	

Fonte: Adaptado de XIAO et al. (2017).

#### h) Comparação com outras tecnologias

Ao comparar o CSP com outras fontes de energia, é imperativo mencionar a forma mais madura e utilizada de aproveitamento da energia solar, a fotovoltaica (PV). Essa tecnologia não utiliza ciclo termodinâmico, fluidos ou componentes móveis, sendo capaz de usar o componente direto e o difuso da radiação solar, além de poder ser utilizado em locais de baixa radiação direta (DESIDERI et al., 2013).

No entanto, uma grande desvantagem do sistema é que sua eficiência diminui à medida que a temperatura aumenta, resultando em baixas eficiências de conversão (XU et al., 2016). A eficiência do CSP é muito maior do que o PV, 42% contra 15%, e a produção de energia tem custo quatro vezes menor, isso devido que, para produzir o mesmo valor de energia, a instalação CSP requer um local quatro vezes menor do que para os sistemas fotovoltaicos, já que a radiação solar na Terra é baixa e, portanto, precisa de uma grande quantidade de células solares caras (UMMADISINGU; SONI, 2011; HAN et al., 2017; XIAO et al., 2017).

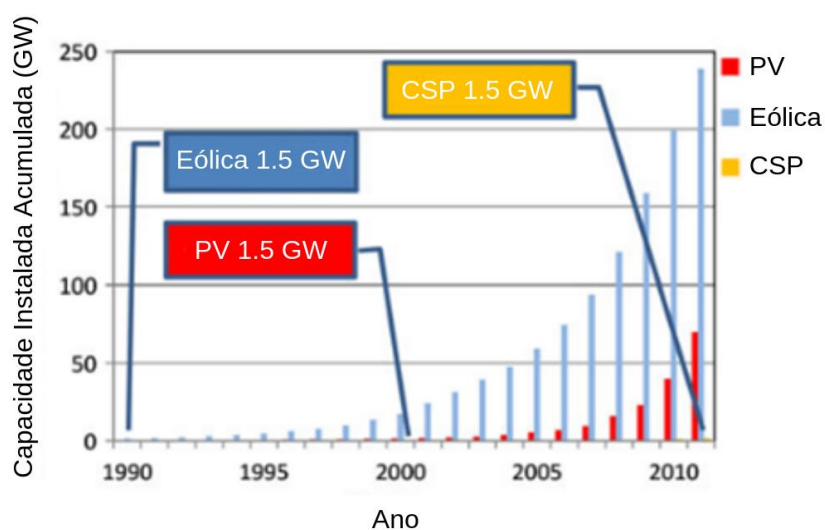
Além disso, as formas de armazenamento para os sistemas PV são muito mais caras do que as do CSP, pois o CSP armazena energia térmica, enquanto a fotovoltaica armazena energia elétrica, necessitando de dispendiosas baterias (PY et al., [s.d.]). Sendo assim, o CSP apresenta as seguintes vantagens sobre os sistemas fotovoltaicos: maior eficiência de conversão de energia, maior e mais barata

capacidade de armazenamento de energia e produção de energia a um preço menor (MOON et al., 2014).

Em relação ao tamanho das usinas, os sistemas fotovoltaicos estão na frente quando se trata de usinas menores ou domésticas. As usinas CSP necessitam de maiores áreas e, conseqüentemente, elevado investimento, se comparado às demais fontes comerciais de energia renovável, como a PV e a eólica (DESIDERI et al., 2013; TRIEB; FICHTER; MOSER, [s.d.]; HINKLEY et al., 2013; DU et al., 2018).

Uma consequência desse fato é apresentada na Figura 3.14, onde uma capacidade instalada de 1,5 GW foi alcançada apenas em 2011, enquanto a mesma quantidade foi alcançada pela PV, em 2000, e pela energia eólica em 1990. Essas duas fontes de energia renovável amadureceram muito antes da CSP e, conseqüentemente, seus custos foram reduzidos ao longo dos anos através de estudos e economias de escala, enquanto a CSP ainda está em fase de aprendizado (TRIEB; FICHTER; MOSER, [s.d.]).

Figura 3.14 – Capacidade instalada acumulada em função do tempo para fotovoltaica (PV), eólica e CSP.



Fonte: Adaptado de Trieb, Fichter e Moser ([s.d.]).

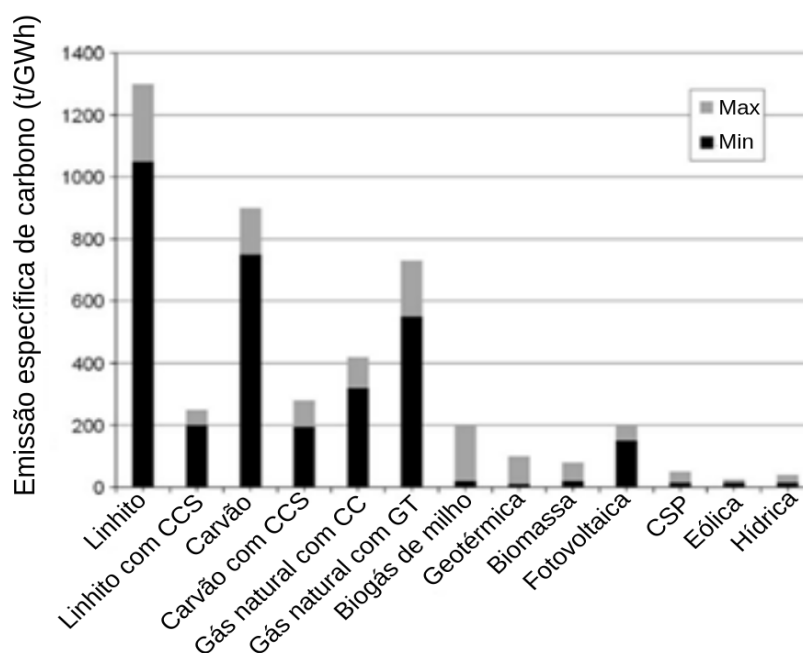
Uma vantagem da tecnologia CSP é seu tipo de operação, que oferece oportunidade de controle, tornando-a flexível. Diferente das turbinas eólicas e instalações fotovoltaicas, que são flexíveis apenas quando estão em funcionamento, os operadores das usinas CSP podem direcionar os fluxos de energia dentro da usina e acessar energia no armazenamento térmico, fornecendo energia flexível sob demanda, o que vem atraindo os investimentos para a tecnologia (DU et al., 2018;

KOST; FLATH; MÖST, 2013; WAGNER et al., 2017; TRIEB; FICHTER; MOSER, [s.d.]).

Além disso, as células solares fotovoltaicas e as turbinas eólicas dependem de fontes variáveis de energia, uma vez que uma simples nuvem pode reduzir consideravelmente ou até zerar a capacidade disponível. Variações meteorológicas podem levar a baixas incidências de sol ou vento, por semanas. Em contraste, o sistema CSP pode contar com sua capacidade de armazenamento de energia térmica ou combustível de reserva para fornecer capacidade firme sempre que necessário (PIETZCKER et al., 2014; TRIEB; FICHTER; MOSER, [s.d.]; UMMADISINGU; SONI, 2011; MCFARLANE et al., 2014; DU et al., 2018).

Em relação aos impactos ambientais, apenas a energia eólica e a energia hídrica apresentam menores índices de emissões de gases de efeito estufa em comparação ao CSP, como mostra a Figura 3.15. Somado a isso, também tem um dos menores impactos na transformação da terra, assim como o PV. Entretanto, como já foi dito anteriormente, a necessidade de água ainda é um fator importante para o sistema CSP, principalmente o resfriamento por via úmida (TRIEB; FICHTER; MOSER, [s.d.]; DU et al., 2018).

Figura 3.15 – Emissão de gases de efeito estufa de ciclo de vida para diferentes fontes de energia (CO<sub>2</sub> equivalente em toneladas por GWh). CCS - Captura e retenção de carbono, CC - ciclo combinado, GT turbina a gás.



Fonte: Adaptado de Trieb, Fichter e Moser ([s.d.]).

Portanto, a tecnologia CSP se destaca por apresentar capacidade de energia firme disponível sob demanda e menor custo de armazenamento de energia, sendo classificada entre as melhores opções renováveis em relação aos impactos ambientais e custos socioeconômicos externos relacionados (TRIEB; FICHTER; MOSER, [s.d.]).

## CAPÍTULO 4: ESTUDO DE CASO

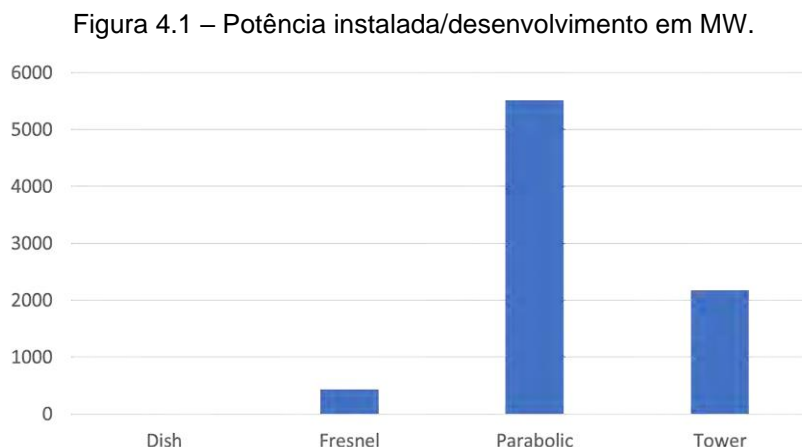
A adoção de fontes limpas e renováveis de energia é um influenciador para o aumento de participação da energia heliotérmica ao longo do prazo. Medidas governamentais em relação às pegadas de carbono e às emissões de gases com efeito de estufa corroboram com o crescimento deste setor.

### 4.1 Projetos de usinas de energia heliotérmica e seleção do caso

O mercado de energia heliotérmica da China deve superar a marca de 7 GW em 2025 (MOHAMMEDI, 2013). O Governo da China, em seu décimo terceiro plano quinquenal, definiu a instalação de 110 GW com usinas solares, dos quais 5 GW serão heliotérmicos. Os Estados Unidos, por sua vez, deverão registrar um crescimento de mais de 8% até 2025.

A fácil integração das usinas heliotérmicas com a rede faz dela uma alternativa rentável para a geração em grande escala. Além disso, o aumento da demanda de eletricidade, juntamente com o aumento dos investimentos para elevar os índices de eficiência energética, favorecem positivamente o mercado de energia heliotérmica. Em 2016, o governo federal dos EUA financiou US\$ 9 milhões para pesquisa e desenvolvimento de seis projetos de energia heliotérmica, com o objetivo de reduzir o custo total do projeto através de avanços tecnológicos.

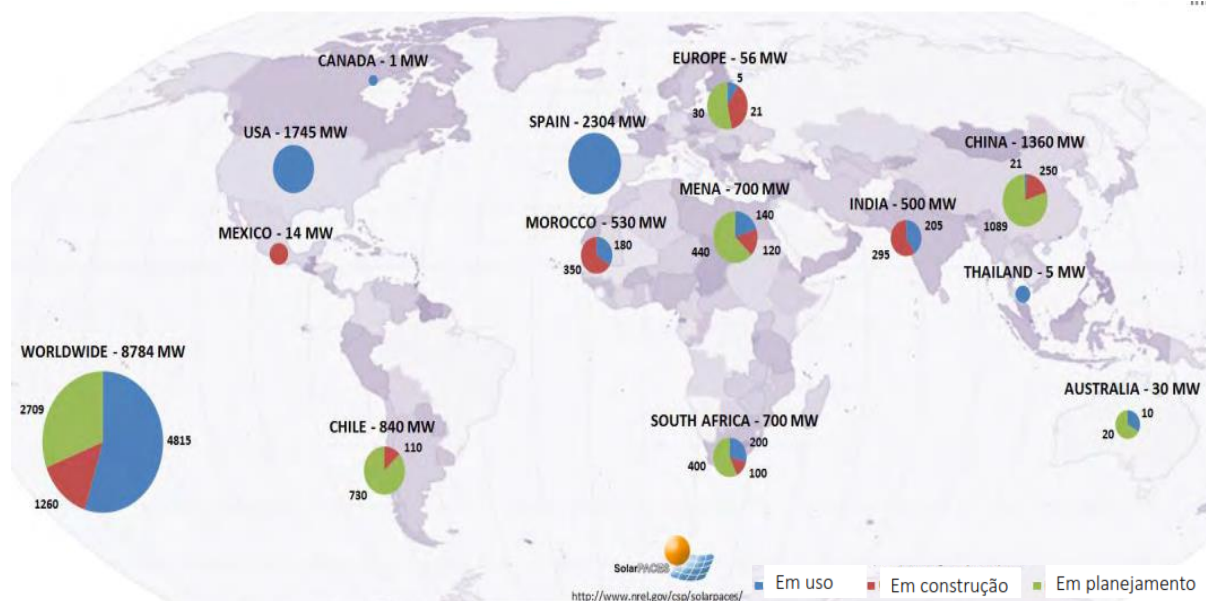
No final de 2018, a potência instalada por tecnologia heliotérmica, em MW, é representada na Figura 4.1. A Figura 4.2 apresenta os países que implementaram energia heliotérmica.



Fonte: Adaptado de NREL (2018).



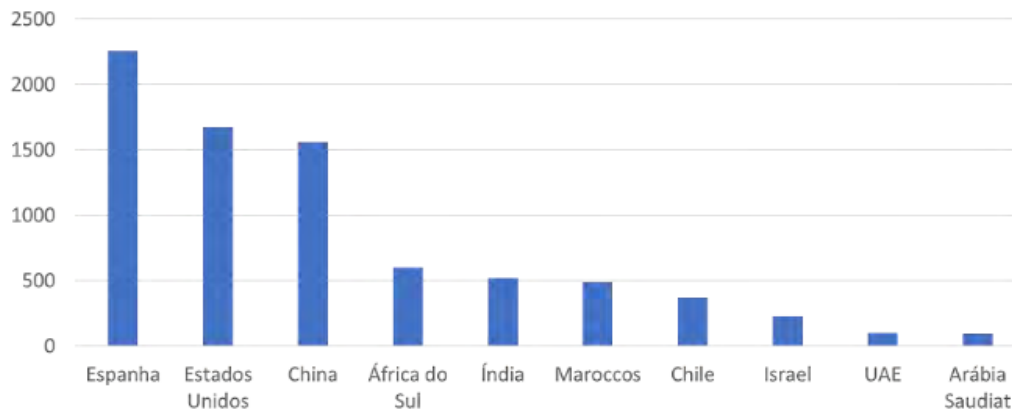
Figura 4.2 – Usinas heliotérmicas em todo o mundo.



Fonte: Adaptado de NREL (2018).

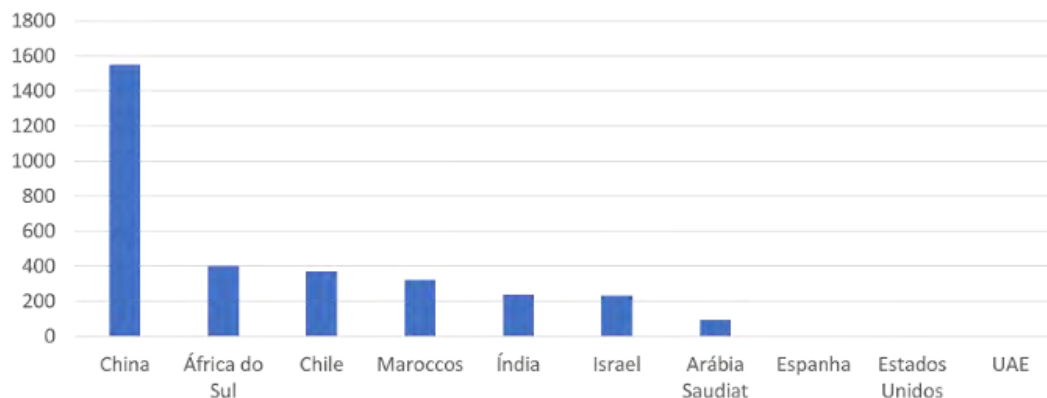
Verifica-se que a potência instalada (Figura 4.3) e em desenvolvimento (Figura 4.4) por países, a aposta na energia heliotérmica se encontra em um patamar mais evoluído e com legislação que sustenta esse desenvolvimento.

Figura 4.3 – Potência instalada por países de referência na energia heliotérmica (em MW).



Fonte: Adaptado de NREL (2018).

Figura 4.4 – Potência instalada em desenvolvimento por países com relevância na energia heliotérmica (em MW).



Fonte: Adaptado de NREL (2018).

Para a escolha do Estudo de caso foi selecionado uma das centrais geradoras da Usina NOOR, pois se trata de uma Usina Heliotérmica CSP de referência mundial, com uma capacidade instalada de 580 MW e que é descrito na seguinte seção.

## 4.2 Histórico da Usina NOOR

De acordo com o Climate Action Tracker (2020), Marrocos definiu a sua Meta, para 2030 de inserção de energias Renováveis na sua Matriz como uma das mais ambiciosas do Mundo, 52% da energia consumida, vir de Energias renováveis.

Para que esta meta se tornasse real, Marrocos decidiu, entre outros projetos, construir numa área de 3000 hectares – o equivalente a 3500 campos de futebol – o Complexo Noor-Ouarzazate, Figura 4.5. O projeto gera eletricidade o suficiente para abastecer uma cidade do tamanho de Praga, cuja população é de um milhão e duzentos mil habitantes.

Figura 4.5 – Imagem panorâmica NOOR 1 CSP.



Fonte: ACWAPOWER (2019).

Situado na porta de entrada para o deserto do Saara, todo o complexo fornece 580MW, e que evita a emissão de 760.000 toneladas de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. O estudo de caso se concentra em uma unidade deste gigante complexo – a NOOR 1 conforme se verifica na Figura 4.5.

### 4.3 Descrição Técnica da Usina NOOR 1

Conforme apresentado no capítulo 3, diversas opções tecnológicas existem para a energia solar heliotérmica. Para o caso da NOOR 1, o Quadro 4.1 apresenta as características técnicas da Usina.

Quadro 4.1 – Descrição Técnica da Usina NOOR 1.

Capacidade:	160 MW
Área:	450 ha
Custo:	176 milhões
Início da construção:	10/05/2013
Início da operação:	04/02/2016
Preço/ valor de venda:	16,2c\$/kWh
Construtora:	Sener; TSK e Acciona
Operadora:	Nomac
Espelhos:	500.000
Temperatura de trabalho:	293 – 393 °C
Possui tratamento de água	Sim
Fluido:	Dowtherm A – oil - Evapora à temperatura de 420 °C e 10,5 bar e congela a 12 °C
Capacidade do Armazenamento:	3 hs
Fluido de armazenamento:	Sal fundido
Cidade:	10 km de Ouarzazate
Critérios de escolha do local	Critérios – incluindo recursos solares, disponibilidade de terra e superfície, proximidade de fontes de água e disponibilidade da rede elétrica
DNI:	2500 kWh/m <sup>2</sup> /ano
Hibridização:	Não tem
Consumo de água:	2,3 milhões m <sup>3</sup> de água/ano
Armazenamento:	2 tanques

Fonte: Elaboração própria.

Em 19 de novembro de 2012, a MASEN e o consórcio liderado pela ACWA Power assinaram um contrato de compra de energia no valor de US \$ 900 milhões, para a venda da produção líquida de eletricidade do NOOR I CSP IPP com capacidade de 160MW. O NOOR I CSP está localizado a aproximadamente 200 km ao sul de Marraquexe.

Em junho de 2013, o projeto obteve o fechamento financeiro e deu início as obras, conforme mostra a Figura 4.6. O Custo do projeto foi de aproximadamente USD 841 Milhões e teve como principais investidores: Masen (Morocco) (25%), Aries (2,5%), TSk (2,5%), ASRA (1,875%) enquanto os restantes valores do financiamento vieram de recursos públicos. O desenvolvimento de O&M ficou ao cargo da empresa NOMAC.

Figura 4.6 – Construção dos Trabalhos de Construção da usina NOOR 1.



Fonte: ACWAPOWER (2019).

#### 4.4 Projeto e operação da usina Noor 1

Para conhecer sobre o projeto, construção e operação da usina Noor Power Station a pesquisa de campo incluiu também entrevista aprofundada com um dos principais Diretores de Engenharia da Obra, o Engenheiro Duarte Neto. Para isso foi utilizada um questionário semi-estruturado, apresentado no Apêndice A da dissertação.

Sobre a **Tecnologia utilizada** na Obra, Duarte informou que “O Projeto CSP de Ouarzazate consiste na montagem de uma usina termelétrica solar, por meio de um ciclo de vapor de água de 160 MWe que utiliza como fonte de energia primária, a energia solar coletada por um coletor cilindro parabólico” com uma potência instalada de “160MW”.

Questionado sobre a Geração e se ela estava dentro do esperado, Duarte respondeu que *“A Usina tem uma produção anual de 520GWh e que a mesma se encontra dentro do valor esperado e considero no projeto”*. Duarte informou que o tipo de HTF utilizado na usina foi *“o DOWTHERM A”*.

Sobre o tipo de Armazenamento utilizado na Usina, Duarte respondeu *“A planta inclui um sistema de armazenamento térmico por meio de sais fundidos que permitem ampliar a operação e a geração de energia eléctrica durante a falta de radiação solar”*. A área total de implementação da usina informada por Duarte foi de 485 Ha.

Em relação à cadeia produtiva, Duarte informou que a *“empresa que fez o projeto da Usina foi a TSK / SENER / ACCIONA”* e que a empresa dona da Instalação é a ACWA Power. Relativamente à operação da usina, foi respondido que *“a mesma fica a cargo da empresa NOMAC com uma duração de 25 anos”*. Duarte respondeu que *“os fornecedores que participaram da construção civil e de especialidades foram principalmente empresas locais e, também, algumas empresas Espanholas”*. A construção do Projeto teve a duração total de 31 meses.

Em termos de Planejamento Operacional, Duarte respondeu que *“a Principal dificuldade detectada durante a execução da obra foi o transporte para a obra dos equipamentos mais pesados nomeadamente:*

- *Htf/Salt Intercambiadores De Calor - 6x 362t*
- *Gerador – 237 T*
- *HP Turbina – 134 T*
- *Pre –Heaters – 2x92 T*
- *Evaporadores – 2x146 T*
- *Reheaters – 2x 92 T*
- *Transformador Principal - 130 T*
- *Condensador – 140 T*
- *Htf Heaters 2x 90 T”*

Os projetos de usinas de energia solar heliotérmica possuem particularidades próprias do setor e que é influenciado pelas características da região na qual é implementada, especificamente pelas características da radiação solar. A seleção da opção tecnológica depende da existência de recursos necessários, como a água, sal, dentre outros.

Uma das principais dificuldades identificadas na construção da usina é o deslocamento de máquinas e equipamentos necessários para a construção da usina. Devido às regiões selecionadas serem afastadas das cidades há necessidade da mobilização de máquinas e equipamentos de grandes componentes.

## CAPÍTULO 5: CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E METEOROLÓGICAS DO BRASIL E TECNOLOGIAS DO CSP APROPRIADAS PARA A REGIÃO NORDESTE

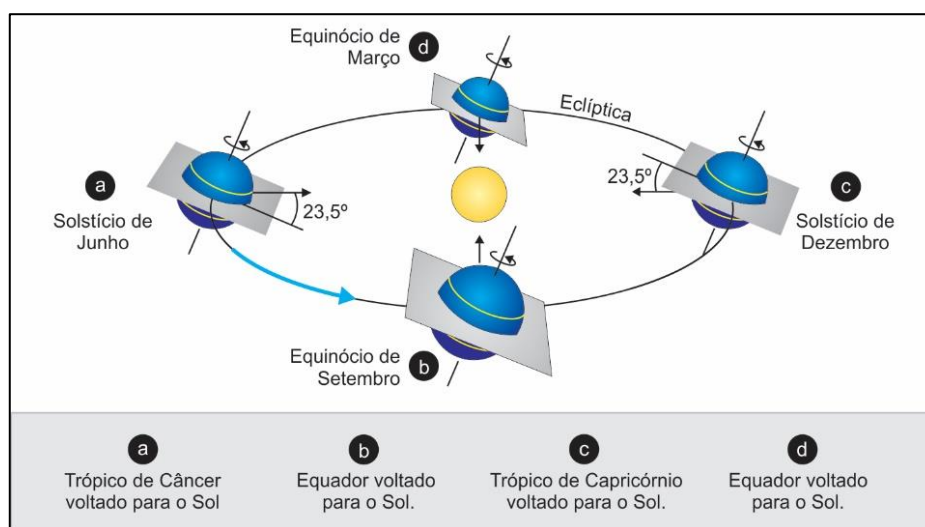
O capítulo apresenta a descrição das condições meteorológicas e climáticas do Brasil. Também apresenta uma análise das regiões mais propícias para a implementação de uma usina heliotérmica e finalmente apresenta uma proposta de tecnologias dos componentes para uma usina heliotérmica.

### 5.1 Condições meteorológicas e climáticas do Brasil

A única energia que o planeta Terra recebe do exterior provém do Sol, reenviando-a praticamente nas mesmas quantidades sobre a forma de radiação de pequeno comprimento de onda (ISLAM et al., 2018; LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012; ZHANG et al., 2013). Assim, uma parte mais reduzida é diretamente refletida e uma outra é armazenada nas plantas através da fotossíntese (ZHANG et al., 2013).

Ao efetuar o seu movimento em torno do Sol, conforme o que se verifica na Figura 5.1, o planeta Terra, realiza uma trajetória elíptica num plano inclinado, com declinação aproximadamente  $23,5^\circ$ , em relação ao plano equatorial (ISLAM et al., 2018; LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012; ZHANG et al., 2013).

Figura 5.1 – Visualização da declinação no sistema orbital Terra-Sol.



Fonte: Oliveira Filho e Saraiva (2012).

Dessa forma, essa mesma inclinação origina a variação da elevação do Sol no horizonte em relação à mesma hora, ao longo dos dias, o que origina as diferentes estações do ano e, conseqüentemente, dificulta a elaboração dos cálculos quanto à posição do Sol para uma determinada data (ISLAM et al., 2018; LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012; ZHANG et al., 2013).

A sucessão das estações do ano e a variação anual das temperaturas são conseqüências da variação da distância entre a Terra e o Sol. A quantidade de energia que chega à Terra é um dos principais fatores que permite à maioria das espécies regular os seus relógios biológicos.

A radiação solar é a radiação eletromagnética que se propaga a uma velocidade de 300.000 km/s, podendo-se observar fenômenos ondulatórios e corpusculares (ISLAM et al., 2018). Ao entrar na atmosfera terrestre, a radiação solar e o seu espectro sofrem algumas modificações devido a espelhamentos sucessivos por partículas em suspensão e absorções em determinados comprimentos de onda específicos por elementos presentes na atmosfera. A radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre provém da região da fotosfera solar, que é uma camada delicada com aproximadamente 300 km de espessura e temperatura superficial da ordem dos 5.800 K (ISLAM et al., 2018; LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012; ZHANG et al., 2013).

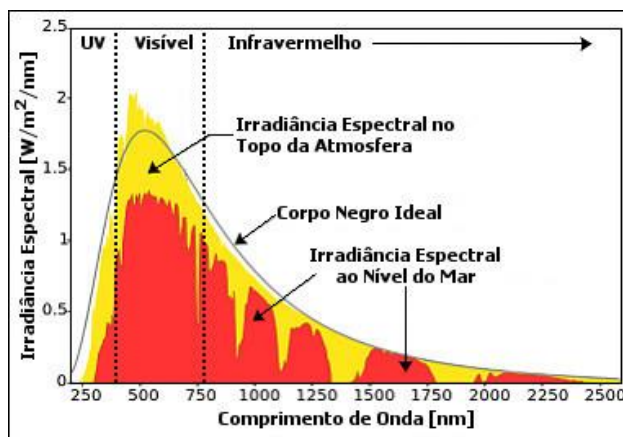
No entanto, a influência das camadas externas do Sol (Cromosfera e Coroa), faz com que não se apresente como um modelo de regularidade. Portanto, a radiação que chega à superfície terrestre e, conseqüentemente, a energia disponível, varia segundo a posição no globo, a radiação incidente e as características geográficas e meteorológicas locais, sendo estas últimas de caráter aleatório e imprevisível.

Mesmo assim, dados recentes da WMO (*World Meteorological Organization*) indicam que a radiação solar incidente sobre uma superfície perpendicular ao eixo Terra-Sol, situada nas camadas superiores da atmosfera, é de aproximadamente 1.367 W/m<sup>2</sup>. Esse valor médio é utilizado como referência, sendo designado por constante solar. Conforme se pode verificar na Figura 5.2, no que concerne ao comprimento de onda, a radiação solar ocupa a faixa espectral de 0,1µm a 5µm, possuindo uma máxima densidade espectral em 0,5µm, chamada de luz verde. É através da teoria ondulatória que são definidas para os diversos meios materiais, as



propriedades na faixa solar de absorção e reflexão e, na faixa de  $0,75\mu\text{m}$  a  $100\mu\text{m}$ , correspondente ao infra-vermelho, as propriedades de absorção, reflexão e emissão (ISLAM et al., 2018; LILLIESTAM; BIELICKI; PATT, 2012; ZHANG et al., 2013).

Figura 5.2 – Comparação entre o espectro solar de diferentes tipos de radiação.



Fonte: World Meteorological Organization (2019).

### 5.1.1 Radiação solar incidente na superfície terrestre

A radiação solar é formada por uma mistura de ondas eletromagnéticas de diferentes frequências. Algumas delas (com comprimento de onda compreendido entre  $0,4\mu\text{m}$  e  $0,8\mu\text{m}$ ) podem ser detectadas pelo olho humano, formando o que se conhece como “luz visível” (ISLAM et al., 2018). Outras, embora não sejam visíveis, fazem notar igualmente os seus efeitos, para demonstrar aos corpos a energia que transportam.

Embora a atmosfera seja muito transparente à radiação solar incidente, somente em torno de 25% penetra diretamente na superfície da Terra sem nenhuma interferência da atmosfera. Na atmosfera, grande parte da radiação sofre absorção e dispersão, como consequência da sua própria estrutura e dos agentes variáveis que se encontram, tais como a poluição e nebulosidade (ISLAM et al., 2018; ZHANG et al., 2013).

A quantidade de energia absorvida depende da massa de ar atravessada pelo raio solar e, por isso, quanto maior for o caminho óptico, maior será a absorção. Assim, a absorção será mínima quando o Sol está situado no ponto mais alto da sua trajetória e será máxima no nascer e no pôr-do-sol. A radiação global que atinge um

plano localizado na superfície terrestre pode ser decomposta em três componentes, de acordo com a Figura 5.3.

- **Radiação direta:** constituída por raios solares recebidos em linha reta do Sol, ou seja, é a radiação que chega à superfície vinda diretamente do disco solar (cerca de 70% do total da radiação);

- **Radiação difusa:** proveniente de todo o céu visível, excluindo o disco solar, e originada pelos raios não diretos e dispersos pela atmosfera. Depende fundamentalmente das nuvens, sendo muito variável no tempo, ou seja, é a radiação que é difratada pelas nuvens e poeiras em suspensão (cerca de 28% do total da radiação);

- **Radiação refletida:** constituída pela parcela de radiação que é refletida ao atingir o solo, denominada de radiação de albedo, ou seja, é a radiação que chega a uma superfície ao ser refletida por outra superfície (cerca de 2% do total da radiação).

Figura 5.3 – Componentes da radiação solar.



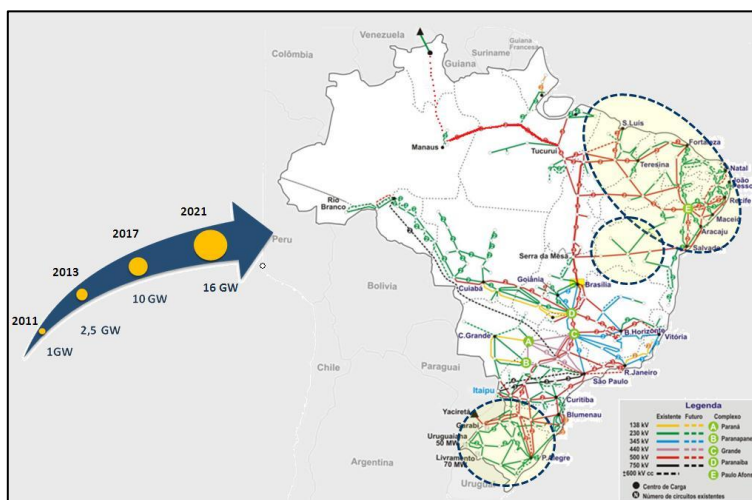
Fonte: Elaboração própria.

## 5.2 Regiões no Brasil mais propícias para a instalação de uma usina Heliotérmica

No Brasil podemos destacar a região Nordeste como a que reúne os melhores índices de radiação (PORTAL SOLAR, 2020). Coincidentemente, derivado a que nesses locais também se encontrem ventos de excelente qualidade para a geração de energia, verifica-se que a instalação de usinas eólicas nos últimos anos cresceu de uma forma exponencial.

Isso permitiu que se desenvolvesse a questão de linhas de transmissão, conforme verifica-se na Figura 5.4, para escoar essa energia com rapidez e qualidade por todo o Brasil.

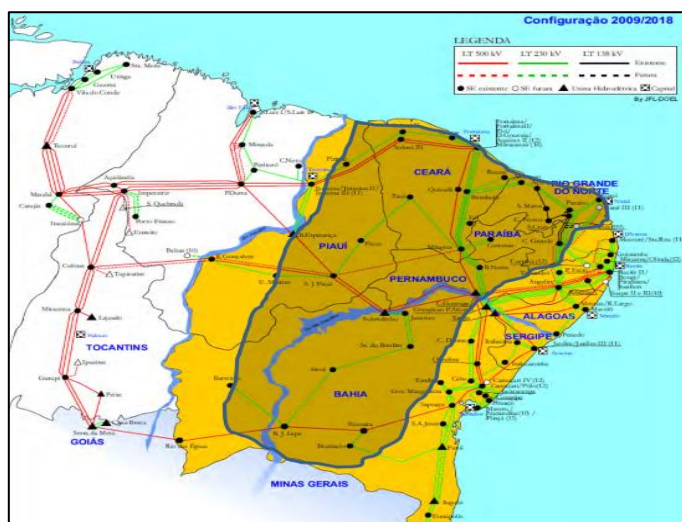
Figura 5.4 – Expansão da Energia Eólica no Brasil – Horizonte 2021.



Fonte: ONS (2019).

Na Figura 5.5 verifica-se que o Brasil possui uma vasta e dinâmica linha de transmissão de energia na região Nordeste, muito impulsionado pela expansão da energia eólica em alguns estados. Essa expansão refere-se a cerca de 20 mil km de linhas de transmissão (cerca de 17% de toda a linha de transmissão brasileira) com cerca de 123 subestações.

Figura 5.5 – Linhas de transmissão da região Nordeste (melhores índices de radiação).



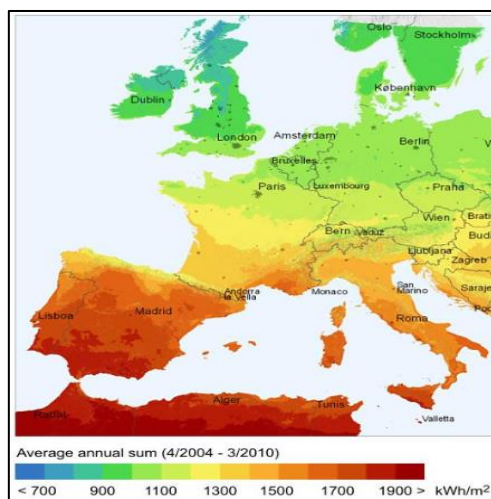
Fonte: ONS (2019).

Esse fator viabiliza a questão técnica de interligação de futuras usinas solares heliotérmicas na região, que somada aos excelentes níveis de radiação, viabiliza a

criação de um *cluster* de energia heliotérmica, podendo gerar um segundo grande impulso econômico para a região, depois da energia eólica.

Para melhor entender a importância da radiação solar no Brasil, pode-se comparar as Figuras 5.6 e 5.7, onde o pior local de radiação do Brasil é melhor do que o melhor local de radiação da Alemanha, por exemplo, país que é considerado com mais investimentos no desenvolvimento da energia solar em todo o mundo.

Figura 5.6 – Radiação horizontal global na Europa.



Fonte: Solargis (2019).

Figura 5.7 – Radiação horizontal global na América do Sul.



Fonte: Solargis (2019).

Uma usina heliotérmica atinge o seu maior grau de eficiência quando a instalação chega em regiões com baixa presença de nuvens e altos níveis de irradiação solar – regiões áridas, secas e planas (ADINBERG, 2011). O Brasil é um país com rico potencial, visto a grande possibilidade de obter a radiação solar direta durante o ano inteiro e, em especial, a região Nordeste oferece excelentes condições climáticas para a realização de usinas heliotérmicas.

As áreas áridas costumam ser desocupadas, pois são poucas produtivas para a agricultura ou pecuária (MEHOS; KABEL; SMITHERS, 2009; PITZ-PAAL, 2017). Contudo, a instalação de uma usina heliotérmica pode levar ao desenvolvimento regional, pois cria postos de trabalho diretos na construção e manutenção da planta heliotérmica, além de postos indiretos através das indústrias fornecedoras para esse novo mercado.

Fora o clima, o Brasil dispõe de outras condições favoráveis e importantes para o sucesso dessa tecnologia: a indústria brasileira e o setor energético são altamente capacitados e produtivos e já existe um setor estabelecido da cadeia produtiva de usinas termoelétricas. Grande parte das peças usadas em usinas heliotérmicas são as mesmas utilizadas em usinas convencionais e, os espelhos e as estruturas metálicas, também podem ser produzidos no país.

Uma usina heliotérmica pode ser construída com mão-de-obra nacional, favorecendo a economia brasileira e o desenvolvimento do setor industrial. O setor envolve diferentes dimensões de empregos, sendo tanto empregos diretos quanto indiretos como: no planejamento e na construção da usina; na operação e manutenção da usina; na cadeia de valor que fornece os insumos para a usina; no terceiro setor (serviços e ciência).

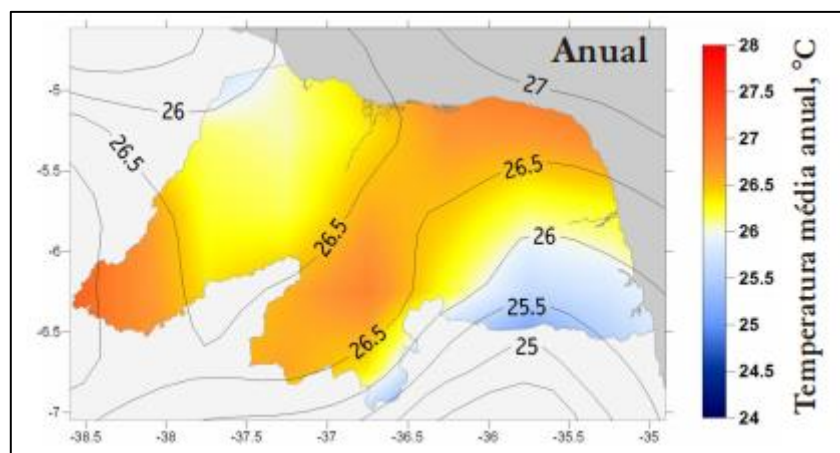
Pesquisadores brasileiros já iniciaram pesquisas nessa área para adaptar a tecnologia às condições locais. No entanto, por se tratar de uma tecnologia relativamente nova e em constante desenvolvimento, o Brasil ainda não dispõe de experiências práticas finalizadas.

Contudo, após análise profunda dos dados extraídos da RBS, das análises climáticas ambientais e considerando a abundância de água potável no local e as infraestruturas de redes de distribuição de energia existentes, a região em torno da

cidade de Assú, no Rio Grande do Norte, possui características muito interessantes e propensa para viabilizar a instalação de uma usina heliotérmica.

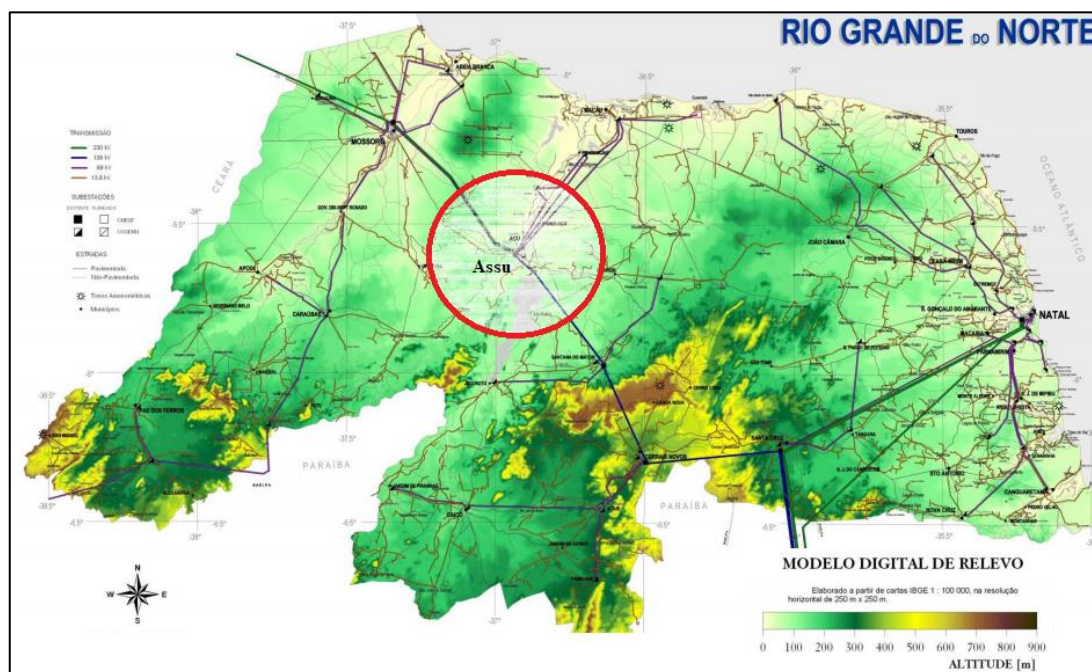
A Figura 5.8 apresenta a temperatura média anual e sazonal no estado do Rio Grande do Norte, baseada em médias climatológicas de 60 anos. A Figura 5.9 apresenta o mapa do Rio Grande do Norte com mapeamento de redes de distribuição de energia elétrica e evidência da localização da área com potencial para instalação de usina heliotérmica.

Figura 5.8 – Temperatura média anual e sazonal no estado do Rio Grande do Norte, baseada em médias climatológicas de 60 anos.



Fonte: Cosern (2003).

Figura 5.9 – Mapa do Rio Grande do Norte com mapeamento de redes de distribuição de energia elétrica e evidência da localização de área com potencial para instalação de usina heliotérmica.



Fonte: Elaboração Própria.

### **5.3 Componentes da tecnologia CSP adequadas à região Nordeste do Brasil**

Para o funcionamento de uma usina de energia heliotérmica, é necessário que o local tenha índices de radiação adequados, devendo ser considerado apenas o componente direto da radiação solar, desconsiderando o componente difuso. As regiões desérticas e áridas são, portanto, as mais adequadas para receber essa tecnologia, pois possuem alta Irradiância Normal Direta.

As características do ecossistema desértico e árido é abundantemente encontrado no interior da região Nordeste do Brasil, nas quais são vantajosas para a implementação de qualquer uma das 4 tecnologias heliotérmicas apresentadas. Outra característica muito interessante do Nordeste, mais especificamente no Rio Grande do Norte, é que tem, em cidades próximas, a maior indústria de exportação de sal de todo o Brasil, vantagem que deve ser explorada com mais estudos específicos, para entender as características técnicas desse sal e a sua eventual utilização no sistema de armazenamento de energia desses sistemas.

Contudo, tendo em vista os argumentos do entrevistado relativamente à questão de viabilidade financeira e amadurecimento da tecnologia CSP, bem como toda a cadeia produtiva associada bem mais desenvolvida do que as demais, a região do Nordeste brasileiro possui excelentes características para que os investidores possam apostar na implementação de usinas CSP.

## **CAPÍTULO 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDACOES**

As energias renováveis, devido às mudanças climáticas observadas nos últimos anos, ganharam maior importância e interesse pelos governantes para desacelerar o aquecimento global. Os relatórios técnicos especializados pela Agência internacional de energia consideram que em 2050 as fontes, eólica e solar, serão os principais fornecedores de energia do planeta.

A Energia Solar Heliotérmica, uma das principais fontes renováveis de energia, aumentou sua participação na matriz energética mundial e, com os projetos em construção, nos últimos anos, suas tecnologias estão ganhando maior maturidade em diferentes continentes. A China, e os Países Árabes, são dos que mais têm investido nos últimos anos nesta fonte de geração para que se torne competitivo frente a outras fontes de energia.

Considerando o exemplo da energia solar fotovoltaica, que devido à implementação de capacidade instalada e, em diversos países, na atualidade considera-se uma fonte viável técnica e economicamente. O mesmo caminho deverá seguir a solar heliotérmica com ganho de experiência na implementação tornara-se viável técnica e economicamente nos diversos países dos continentes.

Quanto aos objetivos definidos na pesquisa, os mesmos foram alcançados. O objetivo específico 1 “identificar os componentes e as tecnologias utilizadas pelas usinas Heliotérmicas e caracterizá-los por meio de uma pesquisa bibliográfica sistemática”, foi alcançado com a identificação e descrição das opções tecnológicas que constam no capítulo 3.

O objetivo específico 2 “analisar um projeto de energia elétrica por via solar Heliotérmica com base na tecnologia cilindro-parabólica, por meio de estudo de caso” foi atingido mediante levantamento e análise de informações de relatórios técnicos, informações de sites do projeto Noor e pela entrevista com um dos Diretores de Engenharia do projeto. A descrição resume está descrita no capítulo 4.

O objetivo específico 3 “Caracterizar as condições meteorológicas e climáticas do Brasil” foi descrito no capítulo 5, na qual identifica-se a região nordeste do Brasil



como uma das regiões favoráveis para a implementação de usinas solares heliotérmicas.

O objetivo específico 4 “Identificar os componentes mais adequados da tecnologia CSP para as características da radiação solar do Nordeste Brasileiro” foram identificados e foram descritos no capítulo 5.

Os projetos de P&D que tratam de CSP, no Brasil, encontram-se em andamento, porém para seu maior desenvolvimento depende de vários fatores, inclusive da capacidade de inserção da indústria nacional nas cadeias globais de fornecimento. Isso requer a adoção de incentivos que fomentem a tecnologia, assim como ocorreu com a fonte eólica.

As principais barreiras para o desenvolvimento de usinas de energia CSP no Brasil são a falta de certas estruturas políticas de longo prazo para o desenvolvimento de energia renovável no país e a ausência de conhecimento sobre as tecnologias CSP e seus potenciais benefícios. Políticas ambientais para motivar a implementação de CSPs é outra barreira que levanta grandes desafios para a promoção de projetos de CSP. Portanto, a regulamentação das políticas atuais e o estabelecimento de novas políticas, bem como a implementação de diretrizes adequadas, são necessários para a promoção de instalação de usinas CSP.

Com a revisão da literatura, concluiu-se que Usinas Heliotérmicas de grande porte podem ser construídos em locais com as características geográficas existentes no Nordeste do Brasil, mais especificamente no Estado do Rio Grande do Norte, conforme se verificou no capítulo 5. Tendo em conta o grande potencial de produção de Sal nesta região, recomenda-se a pesquisa aprofundada das características técnicas e respetiva potencialidade do uso deste Sal nos sistemas de armazenamento utilizados frequentemente na tecnologia CSP.

## REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14724: Informação e documentação. Trabalhos Acadêmicos – Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- ABSOLAR (2016). Disponível em: <<http://www.absolar.org.br>>. Acesso em: 15 de maio de 2017.
- ACWAPOWER. Disponível em: <<https://www.acwapower.com/en/projects/nooro-i-csp-ipp>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2020.
- ADINBERG, R. Simulation analysis of thermal storage for concentrating solar power. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, p. 3588–3594, 2011.
- AMATO, A, et al. Business interruption and loss of assets risk assessment in support of the design of an innovative concentrating solar power plant. 2011.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. 2002. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Brasília.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. 2009. Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA.
- BAHAROON, D. A. et al. Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 996–1027, 2014.
- BAI, Z.; SUN, J.; LIU, Q. Comprehensive assessment of line-point-focus combined scheme for concentrating solar power system. **International Journal of Energy Research**, n. 42, p. 1983–1998, 2018.
- BATUECAS, E. et al. Life Cycle Assessment of heat transfer fluids in parabolic trough concentrating solar power technology. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 171, p. 91–97, 2017.
- BEHAR, O.; KHELLAF, A.; MOHAMMEDI, K. A review of studies on central receiver solar thermal power plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 12–39, 2013.
- COCCO, D.; SERRA, F. Performance comparison of two-tank direct and thermocline thermal energy storage systems for 1 MWe class concentrating solar power plants. *Energy*, v. 81, p. 526–536, 2015.
- CORONA, B. et al. Full environmental life cycle cost analysis of concentrating solar power technology: Contribution of externalities to overall energy costs. *Solar Energy*, v. 135, p. 758–768, 2016.
- COSERN - Companhia Energética do Rio Grande do Norte. Potencial Eólico do Estado do Rio Grande do Norte. Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento COSERN - ANEEL. Camargo Schubert. Iberdrola Empreendimentos do Brasil S.A. 2003. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/atlas\\_eolico\\_RN.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/atlas_eolico_RN.pdf)>. Acesso em: 18 de maio de 2021.
- CRESWELL, J. W. Research design qualitative, quantitative and mixed approaches. 4. ed. California: **Sage Publications**, 2003.

DAMERAU, K. et al. Costs of reducing water use of concentrating solar power to sustainable levels: Scenarios for North Africa. *Energy Policy*, v. 39, p. 4391–4398, 2011.

ENERGIA HELIOTÉRMICA. 2017. Disponível em: <[www.energiaheliotermica.gov.br](http://www.energiaheliotermica.gov.br)>. Acesso em: 30 de janeiro de 2020.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. 2013. Acompanhamento de Empreendimentos Geradores de Energia – AEGE – Instruções para Adesão ao AEGE, EPE.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. 2016. Balanço Energético Nacional 2016 – BEN.

FERNÁNDEZ, A.; DIESTE, J. A. Low and medium temperature solar thermal collector based in innovative materials and improved heat exchange performance. *Energy Conversion and Management*, v. 75, p. 118–129, 2013.

GAUCHÉ, P.; BRENT, A. C.; VON BACKSTRÖM, T. W. Concentrating solar power: Improving electricity cost and security of supply, and other economic benefits. *Development Southern Africa*, v. 31, n. 5, p. 692–710, 2014.

GONZÁLEZ, M. O. A.; GONÇALVES, J. S.; VASCONCELOS, R. M. Sustainable development: Case study in the implementation of renewable energy in Brazil. ***Journal of Cleaner Production***, v. 142, p. 461–475, 2017.

HAMED, O. A. et al. Concentrating solar power for seawater thermal desalination. *Desalination*, v. 396, p. 70–78, 2016.

HERNÁNDEZ-MORO, J.; MARTÍNEZ-DUART, J. M. Concentrating solar power contribution to the mitigation of C-emissions in power generation and corresponding extra-costs. ***Journal of Renewable and Sustainable Energy***, v. 6, n. 5, 2014.

HINKLEY, J. T. et al. An analysis of the costs and opportunities for concentrating solar power in Australia. ***Renewable Energy***, v. 57, p. 653–661, 2013.

IEA. Technology Roadmap: Concentrating Solar Power International Energy Agency Paris, 2010. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/technology-roadmap-concentrating-solar-power>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2020.

IRENA. Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050/publications/2018/Apr/Global-Energy-Transition-A-Roadmap-to-2050. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://irena.org/publications/2018/Apr/Global-Energy-Transition-A-Roadmap-to-2050%0Awww.irena.org>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2020.

IRENA. Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050 Global Energy Transformation. A Roadmap to 2050. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://irena.org/publications/2018/Apr/Global-Energy-Transition-A-Roadmap-to-2050%0Awww.irena.org>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2020.

ISLAM, M. T. et al. A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 987–1018, 2018.

KOST, C.; FLATH, C. M.; MÖST, D. Concentrating solar power plant investment and operation decisions under different price and support mechanisms. *Energy Policy*, v. 61, p. 238–248, 2013.

LILLIESTAM, J.; BIELICKI, J. M.; PATT, A. G. Comparing carbon capture and storage (CCS) with concentrating solar power (CSP): Potentials, costs, risks, and barriers. 2012.

LIM, J. H. et al. Techno-economic evaluation of modular hybrid concentrating solar power systems. *Energy*, v. 129, p. 158–170, 2017.

LIU, M. et al. Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1411–1432, 2015.

MCFARLANE, J. et al. Performance and Thermal Stability of a Polyaromatic Hydrocarbon in a Simulated Concentrating Solar Power Loop. *AIMS Energy*, v. 2, n. 1, p. 41–70, 2014.

MODI, A. et al. Thermo economic optimization of a Kalina cycle for a central receiver concentrating solar power plant *Energy Conversion and Management*, 2016.

MOON, J. et al. High performance multi-scaled nanostructured spectrally selective coating for concentrating solar power. 2014.

NEOSOLAR. Energias renováveis ou energias alternativas. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/energias-renovaveis-ou-energias-alternativas>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2020.

NOMAC. Disponível em: <<https://www.nomac.com/projects/9>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2020.

NREL. Concentrating Solar Power Projects. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/csp/data-tools.html>>. Acesso em: 20 de outubro de 2018.

OLIVEIRA FILHO, K. de S.; SARAIVA, M. de F. O. 2012. Movimento Anual do Sol e as Estações do Ano. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/tempo/mas.htm>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2020.

ONU. Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[http://www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E](http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E)>. Acesso em: 30 de janeiro de 2020.

ORIGINAL REPORTER. A central de energia solar de Marrocos. Disponível em: <<https://www.originalreporter.com/economia/a-central-de-energia-solar-de-marrocos>>. Acesso em: 30 de maio de 2019.

PIETZCKER, R. C. et al. Using the sun to decarbonize the power sector: The economic potential of photovoltaics and concentrating solar power. *Applied Energy*, v. 135, p. 704–720, 2014.

PITCHUMANI, R. Progress in Solar Energy Special Issue: Advances in Concentrating Solar Power. *Solar Energy*, v. 152, p. 1–2, 2017.

PITZ-PAAL, R. Concentrating Solar Power Systems. *EPJ Web of Conferences*, p. 19, 2017.

POWER TECHNOLOGY. The world's biggest solar power plants. Disponível em: <<https://www.power-technology.com/features/feature-largest-solar-power-plants-in-the-world/%0D>>. Acesso em: 13 de junho 2019.

PY, X. et al. Thermal energy storage for CSP (Concentrating Solar Power). [s.d.].

RAVI KUMAR, K.; REDDY, K. S. 4-E (energy-exergy-environmental-economic) analyses of line-focusing stand-alone concentrating solar power plants. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 7, n. 2, p. 82–96, 2012.

SAIT, H. H. et al. Fresnel-based modular solar fields for performance/cost optimization in solar thermal power plants: A comparison with parabolic trough collectors. *Applied Energy*, v. 141, p. 175–189, 2015.

SAMPAIO, P. G. V. et al. Photovoltaic technologies: Mapping from patent analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 93, n. May 2017, p. 215–224, 2018.

SAMPAIO, P. G. V.; GONZÁLEZ, M. O. A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, n. December 2016, p. 590–601, 2017.

SEVERINO, Antonio Joaquim. Metodologia do trabalho científico. 22. ed. rev. e ampl. São Paulo: Cortez, 2002.

SHIELDS, Nicki; MASTERS, James. CNN: SUPERCHARGED – 16 de julho de 2019. Morocco in the fast lane with world's largest concentrated solar farm. Disponível em: <<https://edition.cnn.com/2019/02/06/motorsport/morocco-solar-farm-formula-e-spt-intl/index.html>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2020.

SOL VENTO ENERGIA. Sustentabilidade Energética Solar Termosolar e Eólica. Disponível em: <<http://solventoenergia.blogspot.com>>. Acesso em: 30 de janeiro de 2020.

SOLARPACES. CSP Projects Around the World. Disponível em: <<https://www.solarpaces.org/csp-technologies/csp-projects-around-the-world/>>. Acesso em: 13 de junho de 2019.

TRIEB, F.; FICHTER, T.; MOSER, M. Concentrating solar power in a sustainable future electricity mix. [s.d.].

UMMADISINGU, A.; SONI, M. Concentrating solar power – Technology, potential and policy in India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 5169–5175, 2011.

WANG, J. et al. A novel 2-stage dish concentrator with improved optical performance for concentrating solar power plants. **Renewable Energy**, v. 108, p. 92–97, 2017.

WARD, P. A. et al. High-performance metal hydride based thermal energy storage systems for concentrating solar power applications. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 645, p. S374–S378, 2015.

- WEBSTER, J.; WATSON, R. T. Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Review. **MIS Quartely**, v. 26, n. 2, p. 12, 2002.
- WEINSTEIN, L. A. et al. Concentrating Solar Power. **Chemical Reviews**, v. 115, n. 23, p. 12797–12838, 2015.
- XIAO, G. et al. Thermionic energy conversion for concentrating solar power. **Applied Energy**, 2017.
- XU, X. et al. Prospects and problems of concentrating solar power technologies for power generation in the desert regions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1106–1131, 2016.
- YASINSKIY, A. et al. Dramatically enhanced thermal properties for TiO<sub>2</sub> – based nanofluids for being used as heat transfer fluids in concentrating solar power plants. 2018.
- YIN, R. K. Case study research Design and methods. 2. ed. California: Sage Publications, 2003.
- ADINBERG, R. Simulation analysis of thermal storage for concentrating solar power. *Applied Thermal Engineering*, v. 31, p. 3588–3594, 2011.
- BAHAROON, D. A. et al. Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 41, p. 996–1027, 2014.
- BAI, Z.; SUN, J.; LIU, Q. Comprehensive assessment of line - point - focus combined scheme for concentrating solar power system. *International Journal of Energy Research*, n. 42, p. 1983–1998, 2018.
- BRAUN, F. G. et al. Holding a candle to innovation in concentrating solar power technologies: A study drawing on patent data. *Energy Policy*, v. 39, p. 2441–2456, 2011.
- COCCO, D.; SERRA, F. Performance comparison of two-tank direct and thermocline thermal energy storage systems for 1 MWe class concentrating solar power plants. *Energy*, v. 81, p. 526–536, 2015.
- CRESWELL, J. W. Research design qualitative, quantitative and mixed approaches. 4. ed. California: Sage Publications, 2003.
- DAMERAU, K. et al. Costs of reducing water use of concentrating solar power to sustainable levels: Scenarios for North Africa. *Energy Policy*, v. 39, p. 4391–4398, 2011.
- FONTELLES, M. J. et al. METODOLOGIA DA PESQUISA CIENTÍFICA: DIRETRIZES PARA A ELABORAÇÃO DE UM PROTOCOLO DE PESQUISA. 2009.
- GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991.
- GREENPEACE INTERNATIONAL; SOLARPACES; ESTELA. Concentrating solar power: global outlook 09 - why renewable energy is hot. Greenpeace International, Solar PACES and ESTELA, v. 3rd joint, p. 1–88, 2009.
- GUJARATI, D. Econometria Básica. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

- HO, C. K. Computational fluid dynamics for concentrating solar power systems. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, v. 3, n. 3, p. 290–300, 2014.
- IEA. Technology Roadmap: Concentrating Solar Power. International Energy Agency Paris, 2010. Disponível em: <<https://webstore.iea.org/technology-roadmap-concentrating-solar-power>>
- ISLAM, M. T. et al. A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 91, p. 987–1018, 2018.
- KURAVI, S. et al. Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 39, p. 285–319, 2013.
- LEVINE, D. M. et al. Estatística - Teoria e aplicações usando o Microsoft Excel em português. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- MADAENI, S. H.; SIOSHANSI, R.; DENHOLM, P. Estimating the capacity value of concentrating solar power plants with thermal energy storage: A case study of the southwestern united states. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 28, n. 2, p. 1205–1215, 2013.
- MEHOS, M.; KABEL, D.; SMITHERS, P. Planting the seed. *IEEE Power and Energy Magazine*, v. 7, n. 3, p. 55–62, 2009.
- NREL. Concentrating Solar Power Projects. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/csp/data-tools.html>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- PITZ-PAAL, R. Concentrating Solar Power Systems. *EPJ Web of Conferences*, p. 19, 2017.
- RAVI KUMAR, K.; REDDY, K. S. 4-E (energy-exergy-environmental-economic) analyses of line-focusing stand-alone concentrating solar power plants. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, v. 7, n. 2, p. 82–96, 2012.
- UMMADISINGU, A.; SONI, M. Concentrating solar power – Technology, potential and policy in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, p. 5169–5175, 2011.
- WEINSTEIN, L. A. et al. Concentrating Solar Power. *Chemical Reviews*, v. 115, n. 23, p. 12797–12838, 2015.
- YIN, R. K. Case study research Design and methods. 2. ed. California: Sage Publications, 2003.
- ZHANG, M. et al. Embodied energy and emergy analyses of a concentrating solar power (CSP) system. 2012.

## APÊNDICE 1: PROTOCOLO DA PESQUISA DE CAMPO

### Introdução

A pesquisa de campo é parte da dissertação de mestrado que foi elaborada pelo pesquisador, do Programa de Pós-graduação de Engenharia de Produção (PEP) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

O objetivo da pesquisa é fazer uma descrição técnica e de caracterização de implementação de uma usina heliotérmica de tecnologia CSP instalada no Marrocos.

Para condução da pesquisa foi enviado um questionário para o seguinte profissional:

- Gerente de Pesquisa & Desenvolvimento e/ou de PDP e ou de Engenharia.

O foco do questionário contempla os aspectos relacionados à:

### CARACTERIZAÇÃO DA USINA

1. Qual a tecnologia utilizada na usina?
2. Qual é a potência instalada?
3. Qual é o rendimento/eficiência da usina?
4. Qual é a produção atual? Esses valores estão dentro do esperado?
5. Qual o tipo de HTF?
6. A usina tem algum método de armazenamento e, se sim, qual é?
7. Qual a área total de implementação da usina?

### CARACTERIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA

8. Qual empresa fez o projeto da usina?
9. Qual a empresa proprietária da instalação?
10. Qual é a empresa que explora a usina? Qual a previsão de duração de exploração?
11. Quais foram os fornecedores para a construção civil e especialidades?
12. Quais foram os fornecedores para a fabricação dos componentes? Existiram empresas terceirizadas? Se sim, em que especialidades e quais empresas?
13. Qual a duração total do projeto/instalação?



## CARACTERIZAÇÃO DO PLANEJAMENTO OPERACIONAL

14. Quais foram as maiores dificuldades detectadas durante a execução da obra?
15. Quais foram as decisões de planejamento que foram tomadas durante a execução da obra que, com o aprendizado, tomaria de maneira diferente?
16. Existe alguma situação que faria de forma diferente do que fez na época da construção da usina?
17. Houve algum problema (deficiência) ambiental em relação ao local, que necessitou ser suprido?