

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

GABRIELA SOARES DO NASCIMENTO

**TECNOLOGIAS E CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E
GEOGRÁFICAS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA
SOLAR HELIOTÉRMICA**

**NATAL/RN
2018**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

GABRIELA SOARES DO NASCIMENTO

**TECNOLOGIAS E CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E
GEOGRÁFICAS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA
SOLAR HELIOTÉRMICA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção, como requisito para obtenção do Título de Engenheira de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

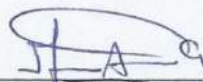
Orientador(a): Prof. Dr. Mario Orestes Aguirre González

**NATAL/RN
2018**

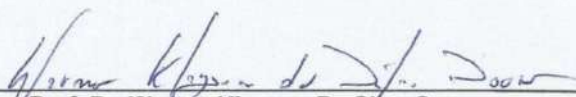
ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao(s) 26º dia do mês de novembro de 2018, nas dependências da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, foi realizada a sessão pública de apresentação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado de **Tecnologias e Condições Climáticas e Geográficas para a Geração de Energia Solar Heliotérmica**, autoria da acadêmica **Gabriela Soares do Nascimento**. A Banca Examinadora foi formada pelo **Prof. Dr. Mario Orestes Aguirre Gonzalez** (orientador) e os convidados **Prof. Dr. Werner Kleyson Da Silva Soares**, **Me. Rafael Monteiro de Vasconcelos** e **Eng. Helder Rodrigues Ferreira** e Após apresentação e arguição e tendo a aluna respondido satisfatoriamente aos questionamentos, o trabalho foi considerado Aprovado com nota final 10,0, cumprindo assim o requisito final para a conclusão do curso de Engenharia de Produção desta Universidade. Nada mais havendo a tratar, encerrou-se a presente sessão lavrando-se a presente ata.

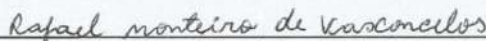
Natal, 26/11/2018




Prof. Dr. Mario Orestes Aguirre Gonzalez
Presidente da banca



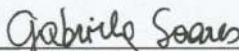
Prof. Dr. Werner Kleyson Da Silva Soares
Membro Efetivo DEP



Me. Rafael Monteiro de Vasconcelos
Membro Externo



Eng. Helder Rodrigues Ferreira
Membro Externo



Gabriela Soares do Nascimento
Acadêmica

Reitor da Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof^a. Dr^a. Ângela Maria Paiva Cruz

Diretor do Centro de Tecnologia
Dr. Luiz Alessandro Pinheiro da Câmara de Queiroz

Coordenador do Curso de Engenharia de Produção
Prof. Dr. Herbert Ricardo Garcia Viana

Coordenador de Trabalho de Conclusão de Curso
Prof. Dr. Herbert Ricardo Garcia Viana

Orientação
Prof. Dr. Mario Orestes Aguirre González

Ficha Catalográfica

Nascimento, Gabriela Soares.

Tecnologias e condições climáticas e geográficas para geração de energia solar heliotérmica / Gabriela Soares do Nascimento. - 2018.

93 f.: il.

Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Produção. Natal, RN, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Mario Orestes Aguirre González.

1. Energia solar - Monografia. 2. Energia heliotérmica - Monografia. 3. Energia renovável - Monografia. 4. Análise de condições climáticas - Nordeste brasileiro - Monografia. 5. Análise de condições climáticas - Rio Grande do Norte - Monografia. I. González, Mario Orestes Aguirre. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.472

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

O trabalho de conclusão de curso não é apenas um trabalho, é o último trabalho feito no curso, é a última avaliação necessária para se tornar um Engenheiro de Produção, são os últimos 3% de integralização do SIGAA, é o momento de finalização dos 5 anos na graduação.

Dessa forma, tenho a agradecer a todos que estiveram presentes nesses últimos 5 anos. Todas as experiências, as conversas, o aprendizado adquirido durante esse tempo, proporcionaram a elaboração deste último trabalho. Pois acredito que este trabalho representa a minha evolução pessoal e profissional, e graças a todos e todas que conheci, conversei, ouvi, me inspirei, e que me ensinaram.

Há uma teoria afirmando que somos a média das 5 pessoas que mais convivemos, mas ousou em dizer que sou a média ponderada de todos que pude estar em contato em minha vida. E assim, agradeço a todos, escola, escoteiro, estágios, universidade, amigos e família por chegar até aqui.

Agradeço a todos meus professores do curso de Engenharia de Produção, por se dedicarem em nos doar um dos bens mais poderosos, o conhecimento. Sou grata por estar em uma universidade de excelência, com professores exemplos. Obrigada pelo respeito, pela atenção e pela amizade.

Em especial, agradeço ao Professor Mario Gonzalez quem me orientou e confiou em fazer esse trabalho, como também abriu as portas para eu conhecer e me encantar com o estudo de energias renováveis. Obrigada professor!

Agradeço, também, aos amigos que fiz no curso, a universidade possibilita o contato diário com pessoas diferentes, e assim conseguir ampliar a visão de mundo. Obrigado pela convivência diária e aprendizado conjunto nesses 5 anos, principalmente Artur Pinheiro, Tuíla Lopes, Maria Santos e Louise Fonseca.

À Monalisa Godeiro, agradeço por ser minha amiga, por ser um exemplo de pessoa, pela parceria e por estar ao meu lado, em todas as aulas, caronas, e na vida.

Agradeço à minha família, por me mostrar a força da união e do amor, pelos cuidados e carinho, pelos ensinamentos e sabedoria, por serem pessoas excepcionais e estarem ao meu lado.

Aos meus pais, Ivan Nascimento e Renata Nascimento, agradeço pela educação, pelo amor, pelo incentivo, por serem os meus maiores exemplos. Não seria quem eu sou, se não tivesse a oportunidade de ter pais como vocês. E agradeço por terem me dado os meus melhores presentes, Guilherme e Giulia, que são minha alegria.

Ao meu namorado, Lucas Coutinho, agradeço a parceria, a paciência, a sabedoria e o bom humor. Obrigada por deixar os meus dias mais leves e felizes, por me ensinar, e por enfrentar os desafios ao meu lado.

“Procurem deixar o mundo um pouco melhor do que
encontraram”
(Lord Baden Powell)

RESUMO

A participação de fontes renováveis na matriz energética tem aumentado nos últimos anos, devido às consequências ambientais negativas e o esgotamento das fontes não-renováveis. A energia solar heliotérmica é uma alternativa para mudar esse cenário, pois utiliza a energia térmica absorvida dos raios solares para gerar energia elétrica. Dessa forma é adequada a locais com altos índices de radiação solar, como o Nordeste brasileiro, conhecido por ter um clima semiárido, com temperaturas elevadas. Este trabalho tem como objetivo identificar as tecnologias de energia heliotérmica mais adequadas às características climáticas e geográficas do estado do Rio Grande do Norte (RN). Para isso, foram realizados: 1) Pesquisa teórica sobre energia solar heliotérmica, 2) sistematização das informações sobre tecnologias, o funcionamento de usinas heliotérmicas e, as condições climáticas e geográficas necessárias, 3) Análise de dados sobre tais condições climáticas e geográficas do RN, e dados dos componentes e características de usinas heliotérmicas no mundo. Trata-se de uma pesquisa teórica com estudo de caso, utilizando artigos científicos, relatórios mundiais e dados do RN em seu desenvolvimento. O propósito é descritivo, uma vez que detalha as características de usinas heliotérmicas e do RN, é uma pesquisa qualitativa-quantitativa, pois são analisados dados numéricos e informações sobre o funcionamento de usinas heliotérmicas. Ao final, chegou-se à conclusão que há regiões no RN com condições adequadas para instalação de usinas heliotérmicas e que a tecnologia mais adequada seria a utilização de torre solar com uso de sal fundido.

Palavras Chaves: Energia renovável. Energia heliotérmica. Análise de condições climáticas. Nordeste brasileiro. Rio Grande do Norte.

ABSTRACT

The participation of renewable sources in the energy mix has increased in recent years due to negative environmental consequences and depletion of non-renewable sources. Concentrating solar power is an alternative to change this scenario, because it uses the thermal energy absorbed from the solar rays to generate electricity. Thus, it is suitable for sites with high solar radiation indexes, such as the Brazilian Northeast, which have a semi-arid climate, with high temperatures. This work aims to identify the concentrating solar power technologies most appropriate to the climatic and geographic characteristics of the state of Rio Grande do Norte (RN). In order to do this, we performed: 1) Theoretical research on concentrating solar power, 2) systematization of information on technologies, the operation of concentrating solar plants and the necessary climatic and geographical conditions, 3) Data analysis on such climatic and geographic conditions of the RN, and data on the components and characteristics of concentrating solar plants in the world. It is a theoretical research with case study, using scientific articles, world reports and data of the RN in its development. The purpose is descriptive, since it details the characteristics of concentrating solar plants and the RN, is a qualitative-quantitative research, since numerical data and information on the operation of concentrating solar plants are analyzed. At the end, it was concluded that there are regions in the RN with suitable conditions for installation of concentrating solar plants and the most appropriate technology would be the use of solar tower with the use of molten salt.

Keywords: Renewable energy. Concentrating solar power. Analysis of climatic conditions. Brazilian Northeast. Rio Grande do Norte.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Distribuição das fontes de energias utilizadas no mundo em 2016..... | 16 |
| Figura 1.2 - Capacidade instalada de usinas heliotérmicas no mundo de 2007 a 2017. | 22 |
| Figura 2.1 - Representação de usina heliotérmica com armazenamento térmico. | 25 |
| Figura 2.2 - Representação das partes de usina heliotérmica. | 28 |
| Figura 2.3 - Representação dos quatro tipos de concentradores: lentes de Fresnel, torre solar, prato parabólico e calha parabólica..... | 29 |
| Figura 2.4 - Foto de usina heliotérmica com calha parabólica. | 31 |
| Figura 2.5 - Representação de um campo solar com calhas parabólicas..... | 32 |
| Figura 2.6 - Foto de usina heliotérmica com torre solar configuração 1..... | 34 |
| Figura 2.7 - Foto de usina heliotérmica com torre solar configuração 2..... | 34 |
| Figura 2.8 - Foto de usina heliotérmica com lentes Fresnel..... | 35 |
| Figura 2.9 - Representação da concentração de radiação solar em uma (a) calha parabólica e em uma (b) lente de Fresnel..... | 36 |
| Figura 2.10 - Foto de usina heliotérmica com prato parabólico..... | 37 |
| Figura 2.11 - Tipos de armazenamento térmico..... | 41 |
| Figura 2.12- Tipos de sistemas de armazenamento térmico..... | 43 |
| Figura 2.13 - Representação de produção de eletricidade em usina heliotérmica com armazenamento térmico e hibridização da produção..... | 47 |
| Figura 2.14 - Tipos de materiais utilizados para o fluido de transferência de energia e suas temperaturas de operação..... | 48 |
| Figura 2.15 - Representação do DNI dos países. | 49 |
| Figura 3.1 – Etapas da pesquisa..... | 54 |
| Figura 4.1 - Participação das tecnologias de concentrador entre as usinas heliotérmicas. | 59 |
| Figura 4.2 - Gráfico da porcentagem da potência (MW) e <i>status</i> das usinas para cada tecnologias. | 60 |
| Figura 4.3 - Quantidade de usinas heliotérmicas por país. | 61 |
| Figura 4.4 - Gráfico da porcentagem de cada tecnologia de usinas heliotérmicas em cada país..... | 62 |
| Figura 4.5 - Número de usinas para intervalos de recurso solar por kWh/m ² /ano..... | 63 |
| Figura 4.6 - Quantidade de usinas para intervalos de área por hectares..... | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.7 - Gráfico da quantidade de empregos necessários na fase de construção das usinas. | 65 |
| Figura 4.8 - Gráfico da quantidade de empregos necessários em usinas em operação. | 66 |
| Figura 4.9 - Tipo de fluidos de transferência térmica utilizados em usinas. | 67 |
| Figura 4.10 - Fluidos de transferência térmica em usinas por cada tipo de tecnologia. | 68 |
| Figura 4.11 - Sistemas de armazenamento térmico em usinas heliotérmicas..... | 68 |
| Figura 4.12 - Sistemas de armazenamento térmico em usinas por tipo de tecnologia. | 69 |
| Figura 4.13 - Percentagem de horas de energia térmica armazenada em usinas. ... | 70 |
| Figura 4.14 - Horas acumuladas no armazenamento para calha parabólica. | 70 |
| Figura 4.15 - Horas acumuladas no armazenamento para lentes de Fresnel. | 71 |
| Figura 4.16 - Horas acumuladas no armazenamento para torre solar. | 71 |
| Figura 4.17- Porcentagem dos ciclos termodinâmicos em usinas..... | 72 |
| Figura 4.18 – Tipos de ciclo termodinâmico para cada tecnologia..... | 72 |
| Figura 4.19 - Capacidade da turbina em MW por quantidade de usinas..... | 73 |
| Figura 4.20 - Radiação solar direta normal do Brasil. | 74 |
| Figura 4.21 - Mapa do Rio Grande do Norte com as populações aproximadas de cada município. | 75 |
| Figura 4.22 - Mapa do Rio Grande do Norte com demarcação de variedades climáticas e tipos de climas. | 76 |
| Figura 4.23 - Curvas pluviométricas do Rio Grande do Norte. | 77 |
| Figura 4.24 - Radiação solar direta normal do Rio Grande do Norte. | 77 |
| Figura 5.1 - Mapa do Rio Grande do Norte com demarcações de radiação solar acima de 1900 kWh/m ² /ano..... | 81 |
| Figura 5.2 - Curvas pluviométricas do Rio Grande do Norte com demarcações de níveis de radiação e pluviométricos adequados..... | 82 |
| Figura 5.3 - Mapa do Rio Grande do Norte com demarcações de áreas adequadas de radiação solar e níveis pluviométricos..... | 83 |
| Figura 5.4 - Mapa do Rio Grande do Norte com a radiação solar e linhas de demarcação das áreas adequadas. | 84 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 2.1 - Relação das etapas e das partes de usina heliotérmica. | 26 |
| Quadro 2.2 - Relação das características dos concentradores. | 30 |
| Quadro 3.1 – Caracterização da pesquisa. | 52 |
| Quadro 4.1 – Dados das usinas heliotérmicas utilizados. | 58 |
| Quadro 5.1 - Fatores para a comparação e escolha da tecnologia de concentração mais adequada para o RN..... | 85 |
| Quadro 5.2- Componentes da usina heliotérmica com concentrador de torre solar.. | 85 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Comparação dos parâmetros dos concentradores..... | 38 |
| Tabela 2.2 - Tipos de materiais utilizados em armazenamento com calor sensível. . | 41 |
| Tabela 2.3 - Tipos de materiais utilizados em armazenamento com calor latente. ... | 42 |
| Tabela 2.4- Tipos de materiais utilizados em armazenamento termoquímico. | 43 |
| Tabela 4.1- Dados da correlação entre o DNI e a produção elétrica..... | 64 |
| Tabela 4.2 - Dados da correlação entre a área e a produção elétrica..... | 65 |
| Tabela 5.1 - Componentes mais utilizados de acordo com a tecnologia de concentração..... | 79 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| Capítulo 1 – INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 Contextualização..... | 16 |
| 1.2 Objetivos | 19 |
| 1.2.1 Objetivo Geral..... | 19 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 20 |
| 1.3 Justificativa..... | 20 |
| 1.4 Estrutura de apresentação do trabalho | 23 |
| Capítulo 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 24 |
| 2.1. Funcionamento da Usina Heliotérmica..... | 24 |
| 2.2. Tecnologias..... | 27 |
| 2.2.1. Campo solar | 29 |
| 2.2.2. Campo de armazenamento | 39 |
| 2.2.3. Campo de energia útil..... | 45 |
| 2.2.4. Forma de transferência de calor | 47 |
| 2.3. Condições de funcionamento..... | 48 |
| 2.4. Síntese da fundamentação teórica..... | 50 |
| Capítulo 3 – MÉTODO DA PESQUISA | 52 |
| 3.1. Caracterização da pesquisa | 52 |
| 3.2. Etapas da pesquisa..... | 53 |
| 3.3. Síntese do método da pesquisa | 55 |
| Capítulo 4 – DESCRIÇÃO DOS DADOS ANALISADOS | 57 |
| 4.1 Descrição das usinas heliotérmicas no mundo | 57 |
| 4.2 Descrição do Rio Grande do Norte | 73 |
| 4.3 Síntese da descrição dos dados analisados | 78 |
| Capítulo 5 – ANÁLISE E RESULTADOS | 79 |
| 5.1 Análise dos dados das usinas..... | 79 |
| 5.2 Análise dos dados do RN..... | 80 |
| 5.3 Escolha da tecnologia para o RN..... | 83 |
| 5.4 Síntese da análise e dos resultados..... | 86 |
| Capítulo 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 87 |
| REFERÊNCIAS | 89 |

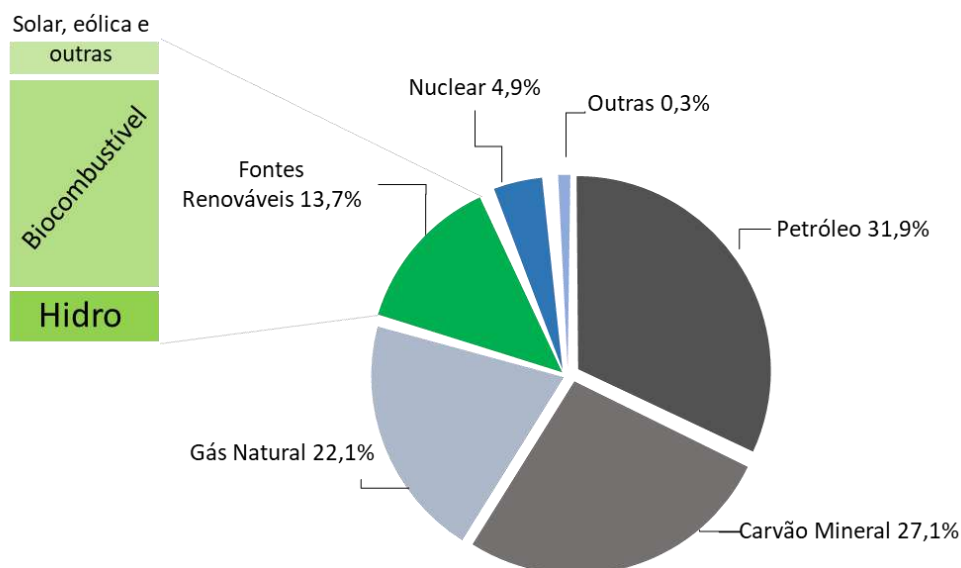
Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A energia elétrica tornou-se de fundamental importância no cotidiano da sociedade com inúmeros usos, por exemplo, no funcionamento de aparelhos eletrônicos, na fabricação de produtos, na prestação de serviços, na iluminação dentre outras. E devido a isto, a energia passou a ser um dos fatores mais importante para o desenvolvimento econômico e para a prosperidade de um país (KHAN; ARSALAN, 2016; MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2011); e sua demanda cresceu significativamente junto com o aumento populacional, da industrialização, e da urbanização (ISLAM et al., 2018; KHAN; ARSALAN, 2016; LIU et al., 2015).

As fontes que geram energia possuem, da mesma forma, um papel central na situação econômica dos países, influenciando a produtividade, o bem-estar e o seu desenvolvimento (GONZÁLEZ; GONÇALVES; VASCONCELOS, 2017). De acordo com a International Energy Agency (IEA), mais de 80% da geração de energia mundial é provinda de fontes convencionais, como gás natural, petróleo e carvão mineral, como apresentado na Figura 1.1 (IEA, 2018).

Figura 1.1 - Distribuição das fontes de energias utilizadas no mundo em 2016.



Fonte: Adaptado de IEA (2018).

Essa estrutura vivenciada traz consequências negativas à sustentabilidade do planeta, pois as fontes convencionais são recursos fósseis, portanto, limitados. Além disso, são prejudiciais ao ambiente, principalmente por serem emissoras de

gases do efeito estufa e assim provocam o aquecimento global (KHAN; ARSALAN, 2016; ZHANG et al., 2012).

Com isso, surge a necessidade para a modificação da estrutura das fontes de energia utilizadas mundialmente, e o uso dos recursos renováveis ganha importância, devendo ser o principal meio de transformação do sistema energético (BAHAROON et al., 2014). Por serem renováveis propiciam a diminuição da dependência por combustíveis fósseis, e assim, podem levar a redução da crise energética. Ainda, por serem de fonte limpa, por não emitirem gases do efeito estufa diretamente, mitigam o aquecimento global, evitando o agravamento das condições climáticas (BAHAROON et al., 2014; CORGNALE et al., 2014; LIU et al., 2015; MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2011; ZHANG et al., 2012).

Existem diversos tipos de fontes de energias renováveis, tais como as energias eólica, solar, hídrica, geotérmica, das biomassas, das ondas e marés (IEA, 2018). O aumento da sua adoção é determinante para o provimento da sustentabilidade no sistema de geração de energia e tem se consolidado nos últimos anos (KHAN; ARSALAN, 2016).

Uma das formas de energia renovável que pode contribuir fortemente com a transformação da estrutura energética é a energia heliotérmica, também conhecida como *Concentrating Solar Power* – CSP (BRAUN et al., 2011; DAMERAU et al., 2011; WEINSTEIN et al., 2015; ZHANG et al., 2012).

Este tipo de energia vem ganhando importância e incentivos, sendo uma forma de geração de energia solar de alta escala, tem baixos impactos ambientais, e ainda possui uma estabilidade maior no fornecimento de energia, devido ao seu armazenamento energético diferencial, em vantagem a outras fontes renováveis (ZHANG et al., 2012).

A energia heliotérmica tem como princípio de funcionamento a concentração de raios solares em um ponto específico, por meio de espelhos que se movem de acordo com o movimento do sol (DAMERAU et al., 2011; HO, 2014; WEINSTEIN et al., 2015). No ponto de concentração há receptores que absorvem a radiação solar e a transformam em energia térmica (DAMERAU et al., 2011; HO, 2014; WEINSTEIN et al., 2015).

O calor absorvido pelo equipamento é levado a uma outra parte da usina, que é responsável pela conversão em energia elétrica (DAMERAU et al., 2011; HO, 2014; WEINSTEIN et al., 2015; ZHANG et al., 2012). Na maioria das usinas, o calor é utilizado para vaporizar a água que fará com que uma turbina se movimente, e por meio da energia mecânica da turbina, será gerada a energia elétrica (BAHAROON et al., 2014; HO, 2014; WEINSTEIN et al., 2015). Tal mecanismo utiliza os princípios da termodinâmica, e possui funcionamento similar com a geração em termoelétricas, com a diferença que o calor, nestas, provem da queima de recursos fósseis (ZHANG et al., 2012; ZHU; KEARNEY; MEHOS, 2014).

A diferença da energia heliotérmica para a energia solar fotovoltaica é a forma da transformação da radiação solar para a energia elétrica (WEINSTEIN et al., 2015). Diferentemente da heliotérmica, as usinas fotovoltaicas convertem a radiação solar diretamente em energia elétrica por meio das células fotovoltaicas presentes nos painéis (KHAN; ARSALAN, 2016; SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017; WEINSTEIN et al., 2015).

Em estudos de comparação das duas tecnologias, Desideri et al. (2013) encontraram que no primeiro ano de funcionamento, uma usina fotovoltaica produz mais eletricidade (MWh) do que uma usina heliotérmica, com menos área utilizada.

Uma outra análise, Desideri et al. (2013) comparou duas usinas – uma fotovoltaica e uma heliotérmica - com a mesma área utilizada. Projetou-se a produção elétrica de ambas durante a vida útil de 30 anos, e com isso, asseverou-se que no primeiro ano, a usina fotovoltaica produz uma maior quantidade de energia. Porém, a produção tende a diminuir com o tempo, ficando menor que a produção da usina heliotérmica, já essa, tem sua produção praticamente constante durante o período em de vida útil (DESIDERI et al., 2013).

Em relação as demais fontes de energias renováveis, a energia solar tem como sua principal dificuldade a constância do recurso natural, ou seja, a instabilidade na geração de energia. Visto que, no caso da energia solar, não há radiação solar constantemente, em momentos do dia o sol não está presente – pela noite, e também em algumas ocasiões o tempo pode estar nublado, fazendo com que não seja possível captar a radiação necessária (ADINBERG, 2011).

A maioria das energias renováveis precisam de baterias para armazenar energia elétrica, e assim se tornarem mais estáveis, como é o caso da energia solar

fotovoltaica (WEINSTEIN et al., 2015). Já a heliotérmica, tem a possibilidade de armazenamento de calor, durante o dia, e com isso, se torna mais vantajosa em relação a outras fontes renováveis (HO, 2014).

A princípio, com o armazenamento de energia térmica é possível a geração de energia ininterruptamente, durante períodos com e sem sol; fazendo com que a usina seja mais eficiente e possibilitando a diminuição de custos da tecnologia, tornando-se uma promessa para o futuro da matriz energética mundial (ADINBERG, 2011; BAHAROON et al., 2014).

Além disso, usinas heliotérmicas possuem vantagem sobre demais tipos de geração de energia devido à sua capacidade de produção, pois trabalha-se com geração em larga escala, em torno de 20 e 50 MW por usina (COCCO; SERRA, 2015). O fato das usinas heliotérmicas possuírem turbinas, possibilita o aumento na escala de produção de eletricidade e com grandes instalações, tornando mais eficiente e melhor o custo-benefício, em relação a usinas fotovoltaicas (WEINSTEIN et al., 2015).

Atualmente, a energia heliotérmica é identificada como uma das mais promissoras para substituir as energias não renováveis e modificar a estrutura energética mundial (ZHANG et al., 2012), além disso, possui alto potencial de geração elétrica em regiões semiáridas, parecidas as condições climáticas e geográficas do Nordeste Brasileiro (IEA, 2010).

O Rio Grande do Norte, por possuir altos índices de radiação solar e ter um clima predominantemente seco (DINIZ; PEREIRA, 2015; SOLARGIS, 2017), é considerado uma região em potencial para a implementação de usinas heliotérmicas.

Entretanto, surge uma questão a ser respondida: Qual a tecnologia para usina heliotérmica que melhor se adequa as características climáticas e geográficas do Rio Grande do Norte? Esta pesquisa objetivou encontrar resposta a esta pergunta.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo da pesquisa foi identificar as tecnologias de energia heliotérmica mais adequadas às características climáticas e geográficas do estado do Rio Grande do Norte.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Conhecer o estado da arte em tecnologias para energia solar heliotérmica;
- Identificar e descrever as condições climáticas e geográficas necessárias para o funcionamento de usinas heliotérmicas;
- Descrever as características climáticas e geográficas do Rio Grande do Norte;
- Analisar as tecnologias e as condições climáticas de usinas já em operação no mundo;
- Comparar as condições climáticas e geográficas de usinas em operações com as condições do Rio Grande do Norte;
- Relacionar as opções tecnológica com as características climáticas e geográficas do Rio Grande do Norte.

1.3 Justificativa

As mudanças climáticas, a degradação ambiental, o esgotamento de recursos fósseis, e a preocupação com a demanda por energia estão crescendo cada vez mais, e um dos principais contribuintes para o agravamento dos impactos ambientais é a utilização de energias não renováveis em larga escala (KHAN; ARSALAN, 2016; MEKHILEF; SAIDUR; SAFARI, 2011). Devido a isso, aumentou-se o investimento com a geração de energia provinda de fontes renováveis, tanto com investimentos em estudos tecnológicos, como em políticas e incentivos fiscais.

Dentre as formas de energia renovável está a energia heliotérmica, a qual utiliza recursos solares para gerar energia elétrica, de uma forma que não agride o meio ambiente e que é possível implementar em muitas regiões do mundo (AMATO et al., 2011).

De uma perspectiva acadêmica, o trabalho pretende reunir informações sobre usinas heliotérmicas, podendo, a partir dele, ter um entendimento holístico do funcionamento de uma usina, assim como identificar as opções tecnológicas. Dessa forma, esta monografia pode contribuir para o auxílio e o fornecimento de informações para demais trabalhos relacionados à energia solar heliotérmica.

Para analisar as pesquisas já feitas no território brasileiro foi utilizado a base de dados do Periódicos Capes - que reúne outras bases de dados como a Scielo, ScienceDirect, Repositórios de Universidades brasileiras, entre outros -, na busca foi

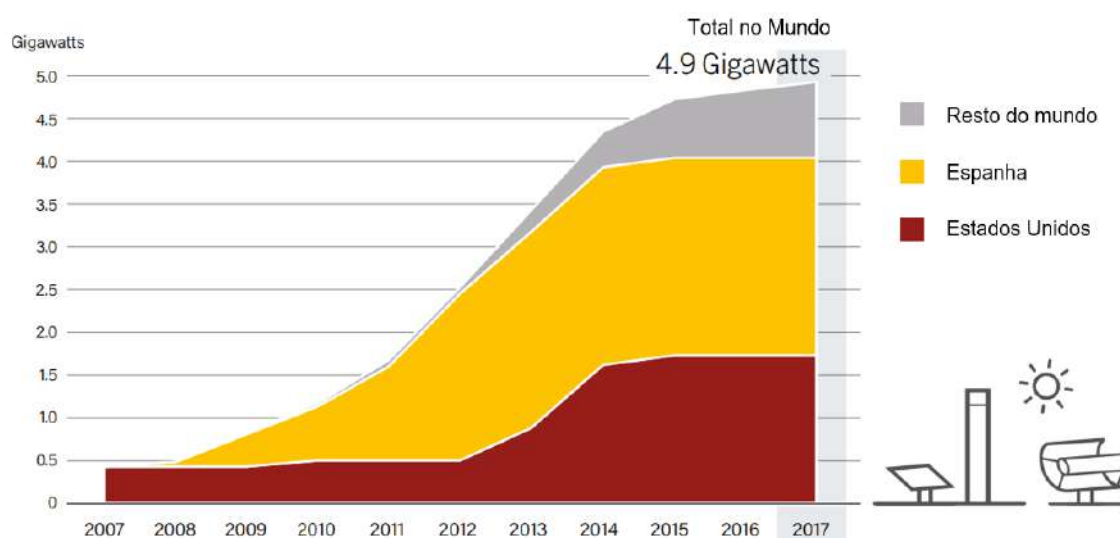
utilizada a palavra-chave “*Concentrating Solar Power*” no título associado a palavra “*Brazil*”, também no título, selecionado apenas artigos, e não foi encontrado nenhum artigo. Depois, foi mudada a palavra chave para “*Concentrated Solar Power*”, juntamente com “*Brazil*”, ambos no título, e o resultado foram 11 artigos encontrados, retirando os artigos repetidos ficaram 4 artigos que são eles: “*Hybrid concentrated solar power (CSP)–biomass plants in a semiarid region: A strategy for CSP deployment in Brazil*”; “*Concentrated Solar Power deployment in emerging economies: The cases of China and Brazil*”; “*Hybridization of concentrated solar power with biomass gasification in Brazil’s semiarid region*”; “*Assessing the potential role of concentrated solar power (CSP) for the northeast power system of Brazil using a detailed power system model*”. O que demonstra que há necessidade de realização de maior quantidade de estudos nesse setor.

Os artigos expostos acima, abordam respectivamente: a análise de implantação de uma usina heliotérmica de 30MW na Bahia, com um sistema hibridizado com “jurema-preta” (SORIA et al., 2015); a análise e comparação da viabilidade de usinas heliotérmicas no Brasil e na China (VIEIRA DE SOUZA; GILMANOVA CAVALCANTE, 2017); a análise do potencial de geração de energia na região Nordeste do Brasil, incluindo energia eólica, fotovoltaica e heliotérmica (FICHTER et al., 2017); e uma análise do funcionamento de uma usina heliotérmica com a utilização de biomassa. E todas elas destacam o Nordeste Brasileiro como potencial para usinas heliotérmicas.

Além da utilização da base de artigos do Periódico Capes, foi procurado os materiais produzidos pelo projeto “Energia Heliotérmica”, parceria do Brasil com a Alemanha. Do projeto foram elaborados diversos estudos, porém não houve uma análise comparativa do tipo da tecnologia e as condições geográficas e ambientais de um local específico.

Quanto à capacidade instalada no mundo, tem-se que, de acordo com o relatório anual da *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*, a capacidade de produção instalada cresceu exponencialmente, passando em dez anos de menos de 0,5 *Gigawatts*, para 4,9 *Gigawatts*, como mostrado na Figura 1.2 (REN 21, 2018).

Figura 1.2 - Capacidade instalada de usinas heliotérmicas no mundo de 2007 a 2017.



Fonte: Adaptado de Renewables 2018 Global Status (2018).

Grande parte desse crescimento é devido, principalmente, a dois países, Espanha e Estados Unidos, que possuem as maiores capacidades instaladas de energia heliotérmica. Mas também deve ser destacado o papel da China, do Oriente Médio e do Norte da África neste contexto (IEA, 2010). Desta forma, percebe-se o crescente investimento na implantação de usinas heliotérmicas no mundo (REN 21, 2018). De acordo com o IEA, espera-se que em 2050, 11,3% da energia elétrica global seja provinda de usinas heliotérmica (IEA, 2010).

A implantação de usinas heliotérmicas, contribui para o desenvolvimento da indústria local, criando empregos durante sua construção e empregos operacionais. Além de movimentar a região, elevando a movimentação de pessoas, modernizando a estrutura da região e incentivando a população a se capacitar.

Portanto, como foi explicitado, o presente trabalho traz estudos sobre uma fonte de energia limpa e renovável que está em expansão, recebendo investimentos em estudos, em avanços tecnológicos e em implantação de usinas. A energia heliotérmica trará benefícios tanto econômicos quanto ambientais para a região que for implantada, por meio do aumento da capacidade de geração de energia e por meio da implementação de uma fonte com baixos impactos ambientais e sem emissão de gases do efeito estufa durante seu funcionamento. Contribuindo assim, para o objetivo estabelecido pelo Acordo de Paris 2030, em combater as mudanças climáticas e para os objetivos do desenvolvimento sustentável, especificamente o objetivo 7, com o

fornecimento de energia limpa e acessível e o objetivo 13, no combate às alterações climáticas.

1.4 Estrutura de apresentação do trabalho

Este trabalho está estruturado em 6 capítulos, sendo o primeiro a introdução do tema a ser discorrido, apresentando o tema do trabalho, a problemática, os objetivos, a justificativa, tanto para a sociedade quanto para a academia e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica, em que aborda explicações sobre o funcionamento de uma usina heliotérmica, detalha os tipos de tecnologias utilizados e descreve as características necessárias de uma região para a viabilidade na implementação de uma usina. No terceiro capítulo é descrito a caracterização da pesquisa e as etapas do seu procedimento.

No quarto capítulo é apresentado a descrição dos dados das usinas no mundo e a descrição sobre o estado do Rio Grande do Norte, com informações sobre a radiação solar, o nível pluviométrico e outros dados relevantes.

No quinto capítulo são abordados os resultados do trabalho, mostrando a análise feita por meio dos dados das usinas do mundo, apresentando a comparação das condições necessárias para implantação de usinas heliotérmicas e as condições presentes no RN, e a proposição da tecnologia que mais se adequa as condições do estado. Por fim, no sexto capítulo são apresentadas as considerações finais da pesquisa, conclusões e recomendações.

Capítulo 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é abordado informações necessárias na descrição do funcionamento de uma usina heliotérmica, sendo dividido em três tópicos principais: o funcionamento da usina heliotérmica, as tecnologias utilizadas na usina e as condições requeridas por uma usina. E para explicar as tecnologias utilizadas a usina foi dividida em quatro partes: o campo solar, o campo de armazenamento, o campo de energia útil e a forma transferência de calor.

2.1. Funcionamento da Usina Heliotérmica

O planeta Terra recebe diariamente uma enorme quantidade de raios solares, esses recursos são naturais e estão presentes de forma abundante (CRABTREE; LEWIS, 2007). Mediante a preocupação com as matrizes energéticas e o uso de recursos renováveis para geração de energia, a energia solar é considerada umas das alternativas mais competitivas (SUN; LIU; HONG, 2015). Há diferentes formas de captar a energia solar, uma delas é por meio da absorção do calor transmitido, conhecida como heliotérmica (IEA, 2010; WEINSTEIN et al., 2015).

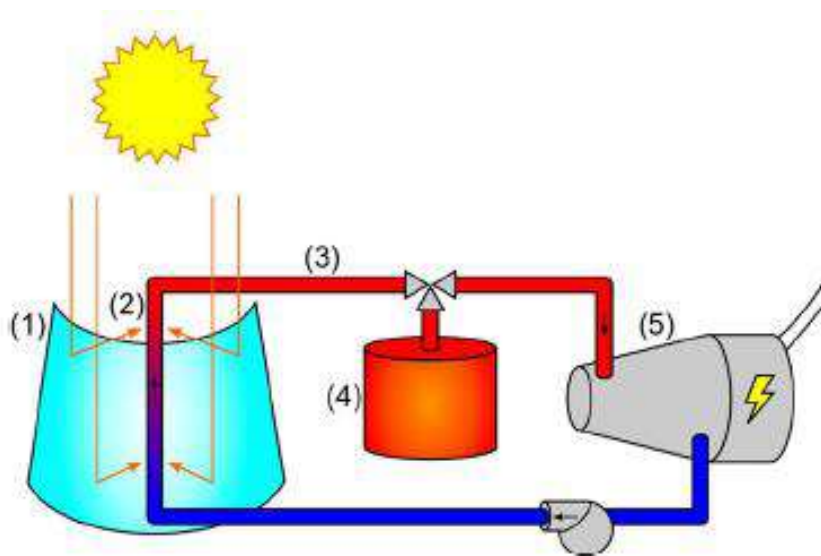
O funcionamento de uma usina heliotérmica baseia-se em conversões de energias, sendo transformada de energia térmica para elétrica (MÜLLER-STEINHAGEN; TRIEB, 2004; PITZ-PAAL, 2017). Inicialmente, os raios solares são concentrados por meio de refletores em um receptor, em que absorve o calor provindo dos raios solares (AMATO et al., 2011; DESIDERI et al., 2013). A energia térmica absorvida irá vaporizar a água, e tal vapor permitirá movimentar uma turbina, dessa forma a energia absorvida é convertida em energia mecânica (PITZ-PAAL, 2017). O gerador irá converter a energia mecânica em eletricidade (PITZ-PAAL, 2017), seguindo princípios termodinâmicos utilizados também em usinas com fontes não renováveis – como carvão mineral, por exemplo – (GAUCHÉ; BRENT; VON BACKSTRÖM, 2014) alcançando altas eficiências devido ao ciclo termodinâmico com temperaturas elevadas (DESIDERI et al., 2013).

Usinas heliotérmicas são compostas por concentradores solares, sistemas de rastreamento solar, receptores, absorvedores, motores elétricos, fluidos de transferência de calor, em alguns casos um sistema de armazenamento térmico, e há também a possibilidade de sistemas de hibridização da usina, esses dois últimos são utilizados para dar continuidade a geração de eletricidade, quando não há recurso

solar ou quando não há suficiente (ISLAM et al., 2018; ORTIZ-RIVERA; FELICIANO-CRUZ, 2009).

Tais componentes podem ser divididos em 5 fases de processos dentro de uma usina, como mostrado na Figura 2.1: (1) concentração, (2) absorção, (3) transferência, (4) armazenamento e (5) geração de energia elétrica (WEINSTEIN et al., 2015).

Figura 2.1 - Representação de usina heliotérmica com armazenamento térmico.



Fonte: Adaptado de Weinstein (2015).

Inicialmente tem-se a concentração, em que os espelhos e os sistemas de rastreamento são responsáveis por direcionar os raios solares, concentrando-os, para que seja possível atingir altas temperaturas (WEINSTEIN et al., 2015).

A segunda fase é a absorção dos raios solares concentrados convertidos em energia térmica, o material utilizado neste componente é de extrema importância, pois é o local que irá receber o calor necessário para dar sequência as outras etapas, ou seja, é necessário que seja convertido uma elevada quantidade de calor, para trazer eficiência nas etapas seguintes (WEINSTEIN et al., 2015).

A terceira fase é a transferência do calor, a forma mais comum de transferi-lo é por meio de fluidos, chamados HTF (*heat thermal fluid*), normalmente esses fluidos são sais fundidos ou óleos térmicos, mas ainda há outros tipos de matérias que podem desempenhar tal função (WEINSTEIN et al., 2015). O autor ainda afirma que essa etapa é comumente encontrada em usinas, porém não é estritamente necessária, pois há mecanismo que transferir o calor diretamente ao motor – a quinta etapa.

Antes de chegar a turbina, o calor pode ser levado a um sistema de armazenamento térmico, que trará estabilidade a usina, possibilitando a geração de eletricidade em momentos adversos (ADINBERG, 2011). Essa etapa, assim como a anterior, não é estritamente necessária para o funcionamento de uma usina, mas é a principal vantagem comparado a outras fontes renováveis (WEINSTEIN et al., 2015).

E a quinta fase é onde ocorre a geração da energia elétrica por meio de um motor, em que a turbina se movimenta com o vapor, convertendo energia mecânica em energia elétrica (WEINSTEIN et al., 2015). Esta etapa irá definir a capacidade da usina e sua eficiência.

Para entender melhor o funcionamento da usina, ela é dividida em 3 partes: um campo solar (*solar field*), um campo de geração de energia (*powerblock*) e um sistema de armazenamento (*storage*) (ADINBERG, 2011; AMATO et al., 2011). O Quadro 2.1 apresenta uma relação entre as partes de uma usina com as etapas do processo.

Quadro 2.1 - Relação das etapas e das partes de usina heliotérmica.

| | Campo Solar | Campo de Armazenamento | Campo de Energia Útil |
|---------------|--------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Concentração | √ | | |
| Absorção | √ | | |
| Transferência | √ | √ | √ |
| Armazenamento | | √ | |
| Geração | | | √ |

Fonte: Elaboração própria.

O campo solar compreende as 2 primeiras etapas da usina, os concentradores e os absorvedores. Nele estão presentes espelhos que se movem de acordo com o movimento do sol durante o dia, e direcionam os raios solares a um receptor (WEINSTEIN et al., 2015).

O sistema de armazenamento é a quarta etapa, responsável por armazenar calor para ser utilizado em momentos com baixa radiação solar (MEHOS; KABEL; SMITHERS, 2009). Há diferentes formas de armazenar o calor e diferentes formas de sistemas de armazenamento, para ser feita uma escolha adequada é necessário analisar a usina de forma holística, ou seja, as características das outras partes da usina (KURAVI et al., 2013).

Da mesma forma ocorre com o campo de energia útil. Este campo é o local onde a energia se converte e ocorrem os ciclos termodinâmicos, para assim, produzir energia elétrica (PITZ-PAAL, 2017). Esta representa a quinta etapa do processo de uma usina.

Já a transferência de energia, a terceira etapa, está presente nas três partes da usina, pois é responsável pelo relacionamento entre o campo solar, o sistema de armazenamento e o campo de geração de energia, e a escolha do material utilizado deve estar condizente com as demais partes da usina (MADAENI; SIOSHANSI; DENHOLM, 2013).

2.2. Tecnologias

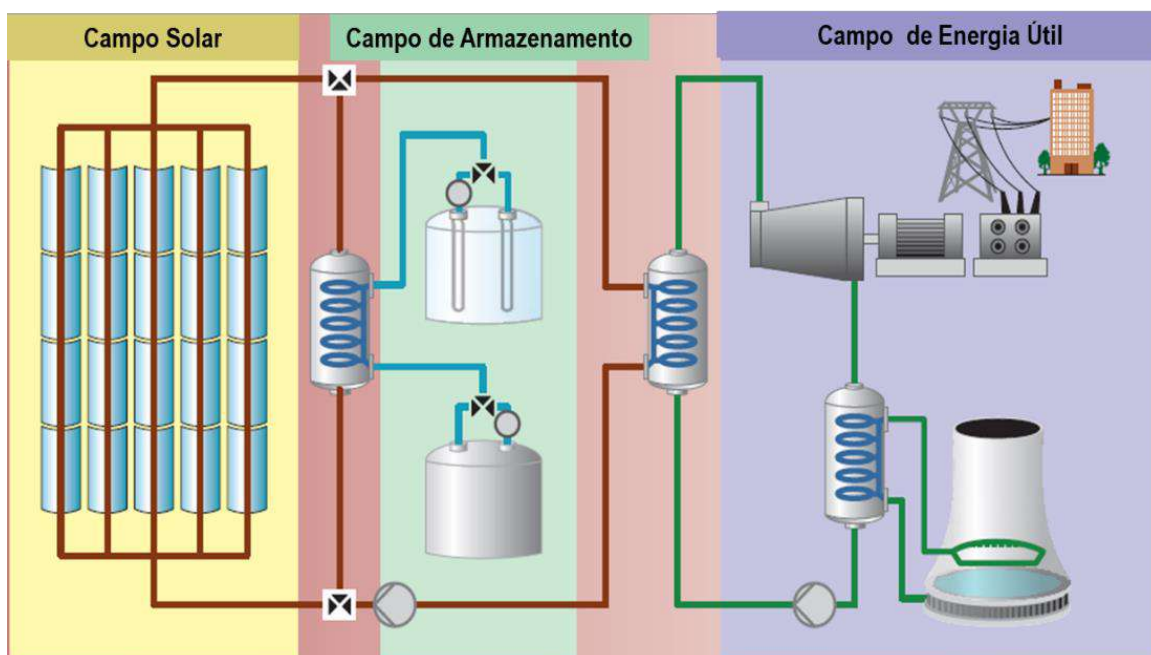
Uma usina é a combinação de várias tecnologias trabalhando em conjunto, sendo que a escolha de cada elemento irá impactar o funcionamento, e por isso devem ser feitos estudos e análises para que as tecnologias escolhidas sejam adequadas e compatíveis com as outras partes da usina, quais sejam: o campo solar, campo de armazenamento e o campo de energia útil, como apresentado na Figura 2.2.

O campo solar é composto por espelhos que se movimentam de acordo com o movimento diário do sol e por absorvedores, existem diferentes tipos de concentradores que podem ser utilizados, e a escolha por um deles irá influenciar as outras características da usina, como eficiência, fluido de transferência, sistema de armazenamento (WEINSTEIN et al., 2015).

O campo de armazenamento possui diferentes configurações, e estas irão depender das outras características da usina (KURAVI et al., 2013). O sistema representado na Figura 2.2 trata de dois tanques, sendo um quente e outro frio.

O campo de energia útil consiste em uma turbina a vapor, um condensador e um sistema de bombeamento (DESIDERI et al., 2013). Além disso, todos os três campos possuem tubos que permitem a passagem do fluido de transferência de calor.

Figura 2.2 - Representação das partes de usina heliotérmica.



Fonte: Adaptado de IEA (2010).

No campo solar, os espelhos rastreadores refletem os raios solares para um foco, concentrando-os e convertendo-os em energia térmica absorvida por um receptor, sendo que essa concentração dos raios permite aquecer um fluido em altas temperaturas, que irá fluir dentro do absorvedor (AMATO et al., 2011).

Este calor absorvido será distribuído para o campo de armazenamento e para o campo de energia útil (ADINBERG, 2011). Isso só ocorre se a usina possuir um sistema de armazenamento térmico, caso contrário, a energia será levada toda para o campo de energia útil.

Havendo armazenamento térmico, o fluido irá transferir calor ao tanque quente no campo de armazenamento, sendo chamada fase de carregamento do armazenamento térmico (AMATO et al., 2011). Quando esta energia for necessária, por exemplo, em dias nublados ou quando o sol se pôr (BAHAROON et al., 2014), o tanque quente irá liberar a energia recebida por meio do fluido, que será conduzido para o campo de energia útil (AMATO et al., 2011).

No campo de energia útil é composto por tanto o fluido vindo do campo solar quanto o vindo do campo de armazenamento irá aquecer e vaporizar um fluido presente, por exemplo, água (WEINSTEIN et al., 2015). Esse fluido irá sofrer processos de mudança de pressão e temperatura, para assim, movimentar a turbina

e gerar energia elétrica após isso, o vapor volta a ser resfriado e condensado (AMATO et al., 2011; COCCO; SERRA, 2015; GAUCHÉ; BRENT; VON BACKSTRÖM, 2014).

Já o fluido de transferência, é resfriado ao final do processo e distribuído, uma parte levado ao tanque frio no campo de armazenamento, chamando a fase de descarga de armazenamento térmico (AMATO et al., 2011), e a outra, levado ao absorvedor no campo solar, tornando um processo cíclico.

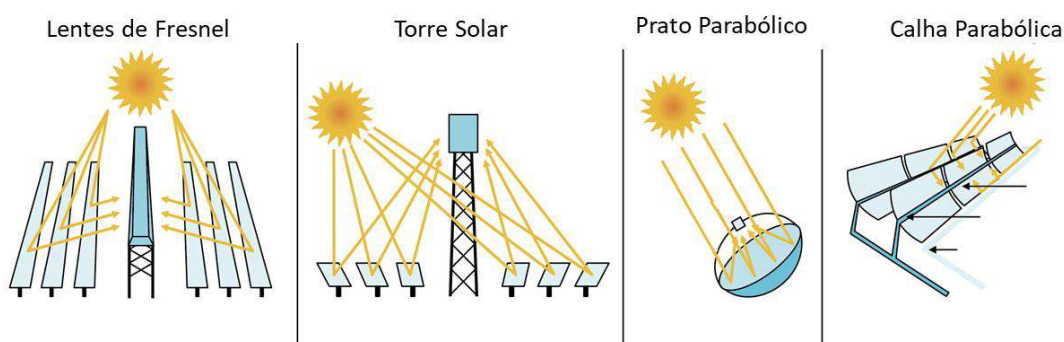
2.2.1. Campo solar

A conversão da radiação solar em energia térmica acontece no campo solar, que consiste em concentradores, responsáveis por focalizar os raios solares, e em receptores, responsáveis pela absorção do calor dos raios solares (BAI; SUN; LIU, 2018; MADAENI; SIOSHANSI; DENHOLM, 2013). A combinação destes dois elementos compreendem a maior parte do custo de uma usina heliotérmica (PITZ-PAAL, 2017).

A eficiência do receptor é fundamental para a usina, pois ele é o responsável por todo o calor utilizado nos processos da usina. Assim é preciso que haja a menor quantidade de perdas de calor neste processo de captação de energia (PITZ-PAAL, 2017).

Em relação ao concentrador, há disponível quatro diferentes opções para compor o campo solar. As tecnologias de concentração são: a calha parabólica (*parabolic trough*), a torre solar (*solar tower*), a lentes de Fresnel (*linear Fresnel reflector*) e a prato parabólico (*parabolic dish*), apresentados na Figura 2.3 (UMMADISINGU; SONI, 2011).

Figura 2.3 - Representação dos quatro tipos de concentradores: lentes de Fresnel, torre solar, prato parabólico e calha parabólica.



Fonte: Adaptado de IEA (2010).

Essas tecnologias podem ser diferenciadas por seu sistema focal (foco pontual ou foco linear), pela rotação dos espelhos e pela superfície apresentada (facetada ou contínua), como resumido pelo Quadro 2.2 (WEINSTEIN et al., 2015).

Quadro 2.2 - Relação das características dos concentradores.

| | Foco Linear | Foco Pontual |
|----------------------------|--------------------|---------------------|
| | Um Eixo | Dois Eixos |
| Superfície Contínua | Calha Parabólica | Prato Parabólico |
| Superfície Facetada | Lentes de Fresnel | Torre Solar |

Fonte: Elaboração própria (2018).

O sistema com foco pontual tem os raios solares direcionados a um único ponto absorvedor, já com o foco linear, os raios solares são concentrados em um tubo linear absorvedor (PITZ-PAAL, 2017). É possível atingir uma eficiência maior com sistemas de foco pontual, pois possuem um índice de concentração maior, porém são caros para implementar e tecnicamente complexos (UMMADISINGU; SONI, 2011; WEINSTEIN et al., 2015). Já sistemas com foco linear, ainda de acordo com os autores, possuem um índice de concentração bem menor, mas são simples e menos caros de implantar.

Devido ao movimento diário do sol do leste para o oeste e periodicamente de norte para o sul, os espelhos necessariamente precisam acompanhar tal mudança, com a finalidade dos raios serem direcionados ao foco, e, para isso, os espelhos são programados para rastrear tal movimento (WEINSTEIN et al., 2015).

A rotação dos espelhos pode ser em dois eixos (norte-sul e leste-oeste) ou em apenas um eixo (leste-oeste) e está diretamente ligada a forma de concentração (WEINSTEIN et al., 2015). Assim, ainda de acordo com o autor, sistemas com focos pontuais possuem rastreamento com dois eixos e sistemas com foco linear possuem rastreamento com um eixo. A calha parabólica e a Lentes de Fresnel são sistemas com focos lineares, já a torre solar e a prato parabólico são sistemas com focos pontuais (BAI; SUN; LIU, 2018; WEINSTEIN et al., 2015).

Já de acordo com a superfície apresentada os concentradores podem se classificar como contínuos, em que os espelhos não possuem separação, como a calha parabólica e a prato parabólico, e como facetados, em que possuem distâncias de um espelho para o outro, como o caso da torre solar e o lentes de Fresnel

(WEINSTEIN et al., 2015). As superfícies contínuas possibilitam uma maior taxa de concentração, ao contrário das facetadas, que perdem quantidades de radiação entre os espaços sem refletores, ainda conforme o autor.

Além disso, as superfícies contínuas possuem um rastreamento mais simples, já que os concentradores estão ligados, porém precisam estar ligadas ao absorvedor para manter o foco, ou seja, ele precisa se movimentar juntamente com o concentrador, diferente de superfícies facetadas (WEINSTEIN et al., 2015). Ademais, segundo o autor, pôr os concentradores facetados terem o receptor estacionário, é possível ocupar uma área maior com refletores.

2.2.1.1. Calha Parabólica ou Cilíndrico Parabólico

A calha parabólica ou cilíndrico parabólico é a tecnologia de concentrador mais madura entre as quatro tecnologias (BAHAROON et al., 2014; BAI; SUN; LIU, 2018), e uma usina consiste em um conjunto de espelhos grandes, em formato de “U” ou de uma calha, utilizados para refletir a radiação e concentrá-la em um tubo absorvedor colocado na linha focal do espelho, como representado na Figura 2.4 (ISLAM et al., 2018; UMMADISINGU; SONI, 2011).

Figura 2.4 - Foto de usina heliotérmica com calha parabólica.



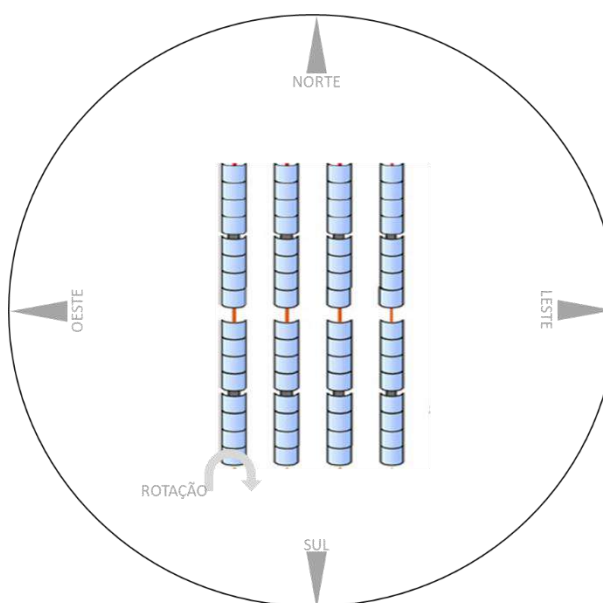
Fonte: Mehos; Kabel; Smithers (2009).

O tubo absorve o calor concentrado dos raios solares por meio de receptores, sendo necessário uma elevada taxa de absorção, dando início ao

processo de transferência de calor na usina por meio de fluidos, que podem ser óleo ou sal fundido (ISLAM et al., 2018).

O campo solar, representado pela Figura 2.5, composto por calhas parabólicas organiza os espelhos em fileiras, linhas paralelas, e alinhadas com o eixo Norte-Sul (ISLAM et al., 2018; UMMADISINGU; SONI, 2011). Essa configuração permite que os espelhos possuam uma rotação Leste-Oeste, acompanhando o movimento diário do sol (Leste-Oeste) (ISLAM et al., 2018; WEINSTEIN et al., 2015).

Figura 2.5 - Representação de um campo solar com calhas parabólicas.



Fonte: Elaboração própria.

A tecnologia de calha parabólica é a mais utilizada atualmente nas usinas em operação, é uma tecnologia de um eixo, com superfície contínua, com sistema de foco linear e superfície altamente reflexiva (RAVI KUMAR; REDDY, 2012; WEINSTEIN et al., 2015).

2.2.1.2. Torre Solar

A torre solar é a segunda tecnologia mais utilizada em usinas heliotérmicas em operação, mas com o início de usinas em desenvolvimento será a tecnologia com mais capacidade instalada mundialmente nos próximos anos (BAHARON et al., 2014; BAI; SUN; LIU, 2018).

Esse fato explica-se pela alta taxa de concentração deste tipo de tecnologia, e também por alcançar temperaturas mais elevadas, aumentando a

eficiência do ciclo termodinâmico, em comparação com tecnologias com o foco linear, como a calha parabólica e as lentes de Fresnel (BAI; SUN; LIU, 2018).

Uma usina com a tecnologia da torre solar é composta por heliostatos e por uma torre central. Os heliostatos são espelhos planos com rotação em dois eixos, norte-sul e leste-oeste, e refletem a luz solar, direcionando-a a uma torre central, a qual absorverá o calor concentrado e distribuirá para as demais partes da usina (BAI; SUN; LIU, 2018; PITZ-PAAL, 2017; UMMADISINGU; SONI, 2011; WEINSTEIN et al., 2015).

Dessa forma, a tecnologia de torre solar possui a superfície facetada, já que os heliostatos são conjunto de espelhos grandes separados, no qual esses espelhos possuem dois eixos, e têm um sistema de foco pontual, no caso na parte superior da torre central (BAHAROON et al., 2014; BAI; SUN; LIU, 2018; WEINSTEIN et al., 2015).

A torre solar possui um custo mais elevado que as demais, pois necessita um receptor de grande escala e um elevado número de heliostatos, sendo o custo mais representativo (BAHAROON et al., 2014; BAI; SUN; LIU, 2018; UMMADISINGU; SONI, 2011). Também, tem como desvantagem o alto consumo de água, utilizada para limpeza dos heliostatos e para o resfriamento da turbina (BAHAROON et al., 2014). Essa tecnologia é viável somente em grande escala, com grandes áreas disponíveis, devido ao seu custo e a eficiência esperada (BAHAROON et al., 2014).

O campo solar com a tecnologia de torre solar pode ser organizado em duas configurações distintas. Na primeira, a torre central tem sua superfície absorvedora direcionada para o Norte, e os heliostatos estão ao norte da torre, com os espelhos direcionados para o sul, ou seja, para a torre central, como mostrado na Figura 2.6 (BAHAROON et al., 2014).

Figura 2.6 - Foto de usina heliotérmica com torre solar configuração 1.



Fonte: Islam et al. (2018).

Já na segunda configuração, mostrada na Figura 2.7, a torre central possui um receptor cilíndrico sendo possível absorver a radiação dos heliostatos que estão a sua volta. Dessa forma, a torre ficará no centro do campo solar e os espelhos no norte, sul, leste e oeste. Esta configuração é conhecida como circular (BAHAROON et al., 2014).

Figura 2.7 - Foto de usina heliotérmica com torre solar configuração 2.



Fonte: Weinstein et al. (2015).

2.2.1.3. Lentes de Fresnel

As lentes de Fresnel, apresentadas na Figura 2.8, não são tão utilizadas em usinas, pois ainda precisam ter sua eficiência óptica aprimorada (BAHAROON et

al., 2014). Essa tecnologia consiste em uma parábola composta por espelhos lineares separados, sendo que cada espelho possui um eixo (leste-oeste), possibilitando um melhor direcionamento para o receptor, esse é um tubo estacionário ou torre linear, que absorve a energia dos raios solares (GREENPEACE INTERNATIONAL; SOLARPACES; ESTELA, 2009; ISLAM et al., 2018; RAVI KUMAR; REDDY, 2012; UMMADISINGU; SONI, 2011)

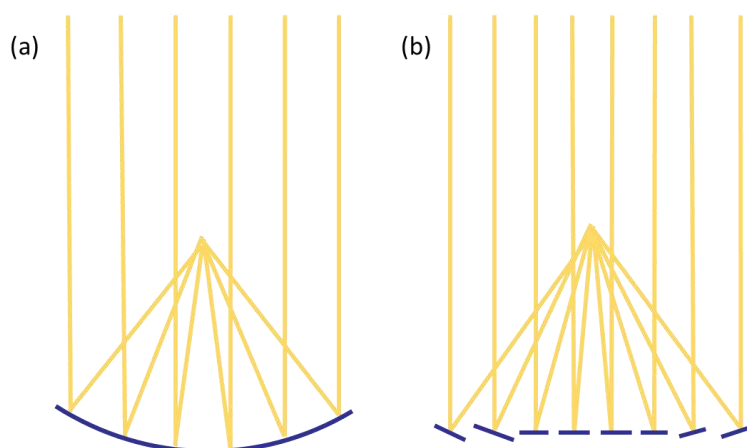
Figura 2.8 - Foto de usina heliotérmica com lentes Fresnel.



Fonte: Islam et al. (2018).

As lentes de Fresnel podem ser visualizadas como uma parábola “quebrada”, dividida em espelhos separados, pois sua superfície é facetada, como representado na Figura 2.9. E devido a esses espaços entre os espelhos, a eficiência é menor em comparação com a calha parabólica, porém o custo também é menor. (BAI; SUN; LIU, 2018; KALOGIROU, 2004).

Figura 2.9 - Representação da concentração de radiação solar em uma (a) calha parabólica e em uma (b) lente de Fresnel.



Fonte: Elaboração própria.

Uma das vantagens dessa tecnologia é a presença do tubo estacionário, pois diferente da calha parabólica e do prato parabólico, o receptor não se movimenta junto com os espelhos. Com isso, a flexibilidade de materiais utilizados como fluidos de transferência é maior (BAHAROON et al., 2014). Ademais, esta tecnologia não necessita de uma grande área, e assim, se torna viável a locais limitados, diferente das demais, segundo o autor.

Outra vantagem também, é na utilização de um sistema de geração direta vapor (DSG), sendo que essa tecnologia também se torna mais viável graças ao tubo estacionário absorvedor (BAI; SUN; LIU, 2018).

2.2.1.4. Prato Parabólico ou Motor Stirling

O prato parabólico ou motor Stirling, apresentado na Figura 2.10, é um concentrador em formato de prato, que concentra os raios solares em um único ponto, sendo assim, possui um sistema de foco pontual. Neste foco está presente uma unidade geradora de energia solar, sendo o mais utilizado o motor Stirling, que gera energia a partir do calor concentrado pelo refletor (GREENPEACE INTERNATIONAL; SOLARPACES; ESTELA, 2009; ISLAM et al., 2018; UMMADISINGU; SONI, 2011).

Figura 2.10 - Foto de usina heliotérmica com prato parabólico.



Fonte: Mehos; Kabel; Smithers (2009).

Diferente das demais tecnologias, cada refletor possui a sua fonte de geração de energia elétrica, e isso propicia uma maior eficiência global (BAHAROON et al., 2014). Além de ter uma rotação em dois eixos, o que consegue se posicionar melhor em relação ao sol (BAHAROON et al., 2014; GEYER; SOLAR; TESKE, 2005; KALOGIROU, 2004).

O prato parabólico tem a possibilidade de ser implantado individualmente, em lugares remotos, com superfícies inclinadas ou irregulares, e ainda, não consome água em seu processo de geração de eletricidade (BAHAROON et al., 2014).

Contudo, não há como integrar a sistemas de armazenamento térmico e há pouca flexibilidade para integração com sistemas de hibridização, além disso, não está disponível comercialmente, devido ao seu custo elevado (BAHAROON et al., 2014).

2.2.1.5. Comparação dos tipos de concentrador

As tecnologias têm características e propriedades individuais que são adequadas a cada situação. Dessa forma, é importante entender a diferença entre elas. A Tabela 2.1 traz dados comparativos dos diferentes tipos de concentrador.

Tabela 2.1 - Comparação dos parâmetros dos concentradores.

| | Calha Parabólica | Torre Solar | Lentes Fresnel | Prato Parabólico |
|---------------------------------------|---------------------|----------------|-------------------|---------------------|
| Eficiência Anual (%) | 14 | 16 | 13 | 20 |
| Eficiência Máxima (%) | 25 | 22 | 18 | 32 |
| Temperatura de Operação (°C) | 400 | 400-600 | 300-400 | 550-750 |
| LCOE (U.S. \$/ kWh) | 0,16-0,40 | 0,13-0,30 | 0,14-0,45 | - |
| Uso da terra (m ² /MWhano) | 6-8 | 8-12 | 4-6 | 8-12 |
| Taxa de concentração | 70-80 | 300-1000 | 25-100 | 1000-3000 |

Fonte: Adaptado de Ummadisingu, Soni (2011) e Weinstein et al. (2015).

Analisando as informações das tecnologias de concentração e reflexão, pode-se notar uma relação entre a temperatura de operação e a eficiência, sendo quanto maior a temperatura maior a eficiência anual. Dessa forma, a tecnologia mais eficiente é o prato parabólico, seguido da torre solar, depois a calha parabólica e por fim as lentes de Fresnel (WEINSTEIN et al., 2015).

Há também na Tabela 2.1 uma diferenciação de eficiência, e consiste em que a eficiência global é geração anual de energia elétrica pela radiação solar anual incidente (WEINSTEIN et al., 2015). Já a eficiência máxima, é a eficiência mais alta alcançada em usinas em operação, conforme o autor.

O LCOE é o *levelized cost of energy*, um indicador que informa o custo em dólar sobre a geração de energia em kWh (WEINSTEIN et al., 2015). É possível considerar que o LCOE é parecido entre as três tecnologias, calha parabólica, torre solar e lentes de fresnel, pois mesmo algumas tecnologias sendo mais caras, como a torre solar, sua capacidade de geração energética também é elevada, tornando o LCOE proporcional as demais tecnologias, da mesma forma as lentes de fresnel, que possui um custo de capital baixo, mas também possui uma eficiência baixa (BAI; SUN; LIU, 2018; COCCO; SERRA, 2015). O prato parabólico não foi considerado por não possuir usinas comerciais, só em demonstração para estudos (BAHAROON et al., 2014; WEINSTEIN et al., 2015).

De acordo com o uso da terra, tem-se que a torre solar e o prato parabólico precisam utilizar mais área, seguido da calha parabólica e por fim as lentes de Fresnel. Já quanto a taxa de concentração dependerá de cada situação, mas em sequência pode-se asseverar que a maior taxa é no prato parabólico, seguido da torre solar, depois a calha parabólica e, a menor, as lentes de Fresnel (UMMADISINGU; SONI, 2011).

2.2.2. Campo de armazenamento

Usinas heliotérmicas tem como principal vantagem a possibilidade de armazenamento de energia (PITZ-PAAL, 2017; WEINSTEIN et al., 2015), com isso permite que períodos sem sol, por exemplo, com dias nublados ou após o pôr do sol, não comprometam a geração de energia elétrica (MEHOS; KABEL; SMITHERS, 2009), criando assim, um abastecimento confiável e consistente (KURAVI et al., 2013).

A principal diferença entre o armazenamento em usinas heliotérmicas, é que ela armazena o calor absorvido (GAUCHÉ; BRENT; VON BACKSTRÖM, 2014). Dessa forma, a energia não necessita passar por ciclos de conversão para ser armazenada ou descarregada, e também o fluido de transferência de calor é compatível com todas as partes da usina, com isso, os custos são menores (MADAENI; SIOSHANSI; DENHOLM, 2013). Já as demais energias renováveis possuem um sistema de armazenamento elétrico, necessitando de investimentos altos (PITZ-PAAL, 2017).

Para que seja possível trazer estabilidade, é preciso acumular uma grande quantidade de energia nos períodos que o sol está presente, e para isso, é preciso ter um campo solar que consiga absorver a quantidade necessária de energia, pois esta energia absorvida será, simultaneamente, utilizada tanto para ser armazenada, como para gerar eletricidade no campo de energia útil (ADINBERG, 2011). E a medida que a energia armazenada for sendo necessária, ela será liberada e transferida para o campo de energia útil, contribuindo para o processo de conversão energética (PITZ-PAAL, 2017).

O armazenamento propicia que a geração de eletricidade seja transferida para momentos de alta demanda (ADINBERG, 2011; PITZ-PAAL, 2017). O ideal seria

que o armazenamento possibilitasse a geração de energia ininterruptamente, produzindo 24 horas por dia, sendo considerada uma usina pura (ADINBERG, 2011). Porém, isso necessita de um campo de armazenamento de grande escala e um campo de energia útil compatível (IEA, 2010).

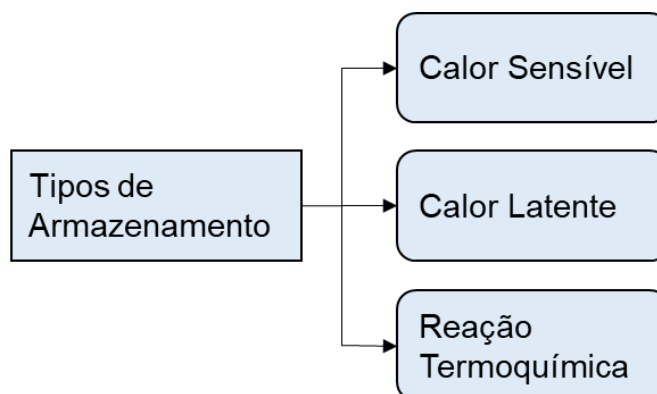
Pela energia solar ser um recurso variável (KURAVI et al., 2013), o armazenamento viabiliza sua geração de forma estável e eleva o potencial de usina, gerando um retorno de investimento mais curto, e assim, mais atraente ao investidores (AMATO et al., 2011).

Ao incluir no projeto de uma usina um campo de armazenamento, é preciso analisar as características dos outros campos, solar e de energia, para que haja uma compatibilidade nas tecnologias e processos utilizados (KURAVI et al., 2013). Parâmetros básicos como a temperatura de operação dos fluidos, a pressão da turbina, o nível de radiação solar, o nível de absorção, são importantes projetar um armazenamento adequado (KURAVI et al., 2013).

E será necessário tomar algumas decisões, como as horas de armazenamento necessárias, se é preciso um armazenamento longo ou curto, o sistema de concentração utilizado no campo solar, a capacidade da turbina no campo de energia útil, entre outros (KURAVI et al., 2013). A compatibilidade e adequação dos parâmetros e das características da usina são possíveis de otimizar e analisar por meio de *softwares* disponíveis, segundo o autor.

Com a análise das características da usina é preciso definir o tipo de armazenamento e o sistema de armazenamento que será utilizado. Os tipos de armazenamento são como o calor será acumulado, sendo armazenamento sensível, latente ou termoquímico, como mostrado na Figura 2.11 (COCCO; SERRA, 2015; KURAVI et al., 2013; WEINSTEIN et al., 2015).

Figura 2.11 - Tipos de armazenamento térmico.



Fonte: Elaboração própria (2018).

O armazenamento de calor sensível acumula energia térmica por meio da elevação da temperatura de um material, sólido ou líquido. Com isso, a energia térmica é acumulada pelo material aquecido, e assim, a taxa de armazenamento dependerá das propriedades do material escolhido.

Essa forma de armazenamento traz facilidade e simplicidade na transferência do calor, que ocorre por meio de convecção forçada (KURAVI et al., 2013). É o tipo mais utilizado em usinas comerciais, ainda que não traga o maior potencial (WEINSTEIN et al., 2015). A Tabela 2.2 mostra os tipos de matérias podem ser utilizados para armazenar calor sensível.

Tabela 2.2 - Tipos de materiais utilizados em armazenamento com calor sensível.

| T (fria) °C | T (quente) °C | Material | Tipo do Meio |
|-------------|---------------|----------------------|--------------|
| 200 | 300 | Areia – rocha – óleo | Sólido |
| 200 | 400 | Concreto Reforçado | Sólido |
| 200 | 400 | Ferro Fundido | Sólido |
| 200 | 50 | NaCl | Sólido |
| 200 | 700 | Aço fundido | Sólido |
| 200 | 700 | Tijolos de sílica | Sólido |
| 200 | 1200 | Tijolos de Magnésia | Sólido |
| 250 | 350 | Óleo sintético | Líquido |
| 250 | 450 | Sal de nitrato | Líquido |
| 270 | 530 | Sódio líquido | Líquido |
| 300 | 400 | Óleo de silicone | Líquido |
| 180 | 1300 | Sal de lítio líquido | Líquido |
| 15 | 400 | Downtherm A | Líquido |
| 0 | 345 | Therminol 66 | Líquido |

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

O armazenamento com calor latente acumula a energia térmica por meio da mudança de fase de um material, conhecido como *phase change materials* (PCM)

(WEINSTEIN et al., 2015). Por exemplo, o material sólido torna-se líquido ao receber o calor, acumulando a energia, e a transição de fase por ser sólido-sólido, líquido-vapor, sólido-líquido (KURAVI et al., 2013). Os tipos de materiais que podem ser utilizados para esses processos estão descritos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Tipos de materiais utilizados em armazenamento com calor latente.

| T (fusão) °C | Material | Calor Latente (J/g) |
|--------------|---|---------------------|
| 307 | NaNO ₃ | 177 |
| 318 | 77,2 mol% NaOH- 16,2% NaCl- 6,6% Na ₂ CO ₃ | 290 |
| 320 | 54,2 mol% LiCl- 6,4% BaCl ₂ - 39,4% KCl | 170 |
| 335 | KNO ₃ | 88 |
| 340 | 52 wt% Zn- 48% Mg | 480 |
| 348 | 58 mol% LiCl-42% KCl | 170 |
| 380 | KOH | 149,7 |
| 380 | 45,4 mol% MgCl ₂ -21,6% KCl -33% NaCl | 284 |
| 381 | 96 wt% Zn -4% Al | 138 |
| 397 | 37 wt% Na ₂ Co ₃ - 35% K ₂ CO ₃ - LiCO ₃ | 275 |
| 443 | 59 wt% Al- 35% Mg-6%Zn | 310 |
| 450 | 48 wt% NaCl- 52% MgCl ₂ | 430 |
| 470 | 36 wt% KCl- 64% MgCl ₂ | 388 |
| 487 | 56 wt% Na ₂ CO ₃ - 44% Li ₂ CO ₃ | 368 |
| 500 | 33 wt% NaCl-67% CaCl ₂ | 281 |
| 550 | LiBr | 203 |
| 632 | 46 wt% LiF-44% NaF ₂ -10% MgF ₂ | 858 |
| 660 | Al | 398 |
| 714 | MgCl ₂ | 452 |

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

Este processo de armazenamento possui pouca mudança de temperatura, sendo considerado quase isotérmico, então não só o calor específico do material é importante, mas também a entalpia na mudança de fase (KURAVI et al., 2013). Segundo o autor, para aprimorar o armazenamento, pode ser utilizado o macro ou microencapsulação, em que os PCMs são encapsulados, aumentando a área de transferência e o controle de volume na mudança de fase.

O terceiro tipo de armazenamento é o termoquímico, em que o calor é armazenado por meio de uma reação química reversível. Para acumular a energia há uma reação endotérmica, e para liberá-la ocorre uma reação inversa exotérmica (WEINSTEIN et al., 2015). Essa forma de armazenamento possui potencial, pois há menos perdas no processo, porém ainda é cara e não é muito utilizada em usinas (KURAVI et al., 2013). A Tabela 2.4 mostra os tipos de reações possíveis.

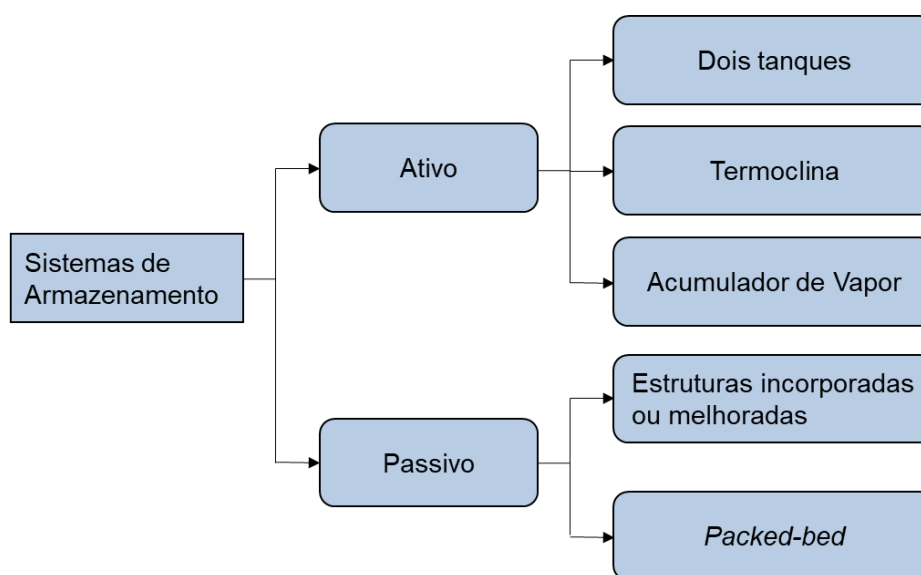
Tabela 2.4- Tipos de materiais utilizados em armazenamento termoquímico.

| Componentes | T ° C | Reação |
|----------------------------|----------|---|
| Óxido de manganês | 530 | $MnO_2 + \Delta H \leftrightarrow 0,5Mn_2O_3 + 0,25O_2$ |
| Hidróxido de cálcio | 505 | $Ca(OH)_2 + \Delta H \leftrightarrow CaO + H_2O$ |
| Carboneto de cálcio | 896 | $CaCO_3 + \Delta H \leftrightarrow CaO + CO_2$ |
| Hidreto de magnésio | 250-500 | $MgH_2 + \Delta H \leftrightarrow Mg + H_2$ |
| Amônia | 400-500 | $NH_3 + \Delta H \leftrightarrow 1/2N_2 + 3/2H_2$ |
| Metano/Água | 500-1000 | $CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$ |
| Óxido de magnésio | 250-400 | $MgO + H_2O \leftrightarrow Mg(OH)_2$ |
| Carboneto de ferro | 180 | $FeCO_3 \leftrightarrow FeO + CO_2$ |
| Hidreto de metal | 200-300 | $Metal\ xH_2 \leftrightarrow metal\ yH_2 + (x - y)H_2$ |
| Metanolação-desmetanolação | 200-250 | $CH_3OH \leftrightarrow CO + 2H_2$ |

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

Além do tipo do armazenamento, é preciso definir o tipo do sistema utilizado, como esquematizado na Figura 2.12. Os sistemas podem ser do tipo ativo, em que um fluido pode se movimentar no tanque; ou passivo, que o meio de armazenamento é sólido e o fluido apenas transfere a energia (KURAVI et al., 2013).

Figura 2.12- Tipos de sistemas de armazenamento térmico.



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

Os sistemas de armazenamento ativos podem ser direto ou indireto. O sistema direto é quando o fluido de transferência é o mesmo que armazena a energia, já o indireto os fluidos de transferência e o de armazenamento são diferentes (MADAENI; SIOSHANSI; DENHOLM, 2013; WEINSTEIN et al., 2015).

As configurações de sistemas ativos são sistemas com dois tanques, com um tanque ou com vapor. O sistema de dois tanques é um dos principais e mais

utilizados (KURAVI et al., 2013; MEHOS; KABEL; SMITHERS, 2009). Essa configuração consiste em dois tanques, um quente com temperatura de aproximadamente 500°C e outro frio, com aproximadamente 290°C (KURAVI et al., 2013).

O fluido de transferência, ao ser aquecido no campo solar, ele chega ao campo de armazenamento, e caso seja um sistema direto, se mantém ao tanque quente, armazenando energia térmica. Quando necessário o fluido é levado ao campo de energia útil, para converter a energia térmica em energia elétrica, com isso, o fluido é resfriado e se direciona ao tanque frio (COCCO; SERRA, 2015).

Caso o sistema seja indireto, o fluido no campo solar irá transferir o calor para o fluido no tanque quente, para armazenar energia; quando for necessária o processo ocorrerá inversamente, e o fluido armazenado transfere calor ao fluido de transferência a caminho do campo de energia útil (MADAENI; SIOSHANSI; DENHOLM, 2013).

O sistema de tanque único ou sistema termoclina, possui um tanque que armazena uma parte quente e outra fria. O topo do tanque terá um fluido quente e a base um fluido frio, criando um gradiente térmico (COCCO; SERRA, 2015; MADAENI; SIOSHANSI; DENHOLM, 2013; WEINSTEIN et al., 2015).

Durante a fase de carregamento, em que o tanque está recebendo energia, o gradiente será bombeado para baixo, aumentando assim a quantidade de fluido quente, já na fase de descarregamento, o gradiente é levado para cima, fazendo com que o fluido quente libere calor (COCCO; SERRA, 2015).

Com uma configuração de apenas um tanque, o sistema termoclina torna-se mais barato na utilização em usinas heliotérmicas, sendo 2/3 do custo de sistemas com dois tanques (COCCO; SERRA, 2015; KURAVI et al., 2013; MADAENI; SIOSHANSI; DENHOLM, 2013).

Outro sistema ativo é o acumulador de vapor, utilizando como material a água, que é superaquecida e transformada em vapor. Ao necessitar da energia acumulada, a energia é liberada e o tanque de armazenamento tem a pressão reduzida (KURAVI et al., 2013).

Além do sistema ativo, é possível armazenar por um sistema passivo, em que o meio de armazenamento é sólido, podendo ser sólidos baratos como rochas,

areia, concreto, materiais que sejam possíveis armazenar calor sensível ou latente. Há dois tipos de sistemas passivos: com estruturas incorporadas ou melhoradas ou *packed-bed* (KURAVI et al., 2013).

O sistema com estruturas de transferência de calor incorporadas ou melhoradas possuem tubos entre o material armazenado, normalmente, um PCM, em que o fluido de transferência quente passa para transferir energia (KURAVI et al., 2013). Conforme o autor, para liberar energia, um fluido frio passa no tubo, e assim a energia do PCM é transferida para o tubo e levada ao campo de energia útil.

Já o sistema *packed-bed*, consiste em um conjunto de materiais armazenados, com diferentes formatos e tamanhos, e um fluido de transferência que passa entre esses elementos, que podem ser rochas (KURAVI et al., 2013). Segundo o autor, o fluido está em contato direto com os materiais havendo um coeficiente de transferência maior. A maioria desses sistemas são de tanque único, e atuam como um sistema termoclina.

2.2.3. Campo de energia útil

No campo de energia útil é onde ocorrem os processos de conversão de energia, em que a energia térmica é absorvida no campo solar, armazenada no campo de armazenagem e convertida em energia elétrica no campo de energia útil.

Por meio de ciclos termodinâmicos, a energia térmica é convertida em mecânica, fazendo movimentar uma turbina e gerar energia elétrica (PITZ-PAAL, 2017). A eficiência dos ciclos aumenta dependendo da temperatura de operação, mas caso essa seja muito elevada, a eficiência diminui devido ao aumento de perdas de calor. Assim, é necessário que a absorção de calor no campo solar esteja compatível com o funcionamento da tecnologia de geração de eletricidade (PITZ-PAAL, 2017).

A conversão da energia é por meio de alterações de pressão, de entropia e de temperatura no fluido de trabalho (PITZ-PAAL, 2017; WEINSTEIN et al., 2015). A primeira etapa de um ciclo termodinâmico é a compressão do fluido em alta pressão; depois o fluido é aquecido por meio do calor absorvido pelo campo solar; em seguida o fluido sofre uma expansão para baixa pressão, por meio do trabalho mecânico exercido na turbina; e por último, o fluido retorna e é esfriado voltando a temperatura inicial (WEINSTEIN et al., 2015).

Para calcular a potência do motor é preciso subtrair da potência produzida pela expansão, a potência necessária para a compressão do fluido (WEINSTEIN et al., 2015).

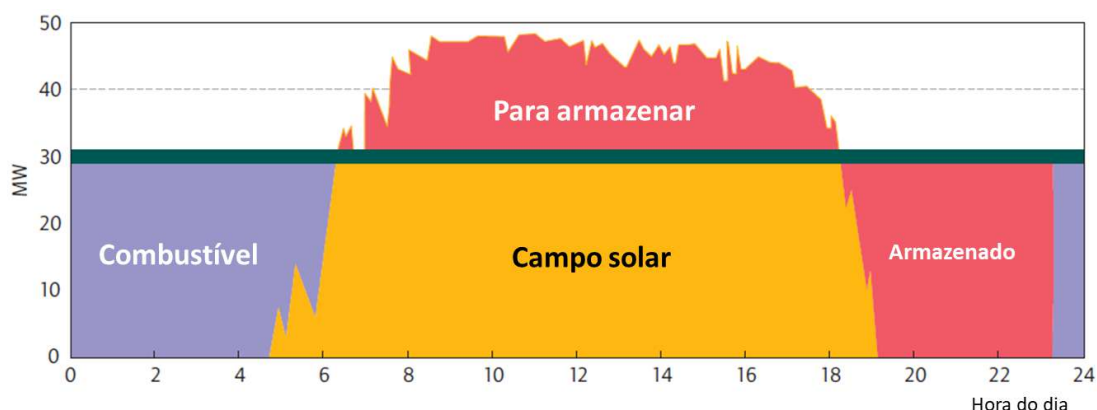
Os ciclos utilizados em usinas heliotérmicas são os de turbina a vapor — ciclo Rankine, o ciclo de turbinas a gás – ciclo Brayton – e motores Stirling. (PITZ-PAAL, 2017). Segundo o autor, o mais utilizado é o ciclo Rankine, e é compatível com calha parabólica, com a torre solar e com as lentes de Fresnel, enquanto o prato parabólico é compatível com o motor Stirling. Ainda conforme o autor, as turbinas a gás, só foram utilizadas em usinas de demonstração. Além disso, o ciclo Brayton pode ser combinado com o ciclo de Rankine para produzir eletricidade com alta potência, com um menor campo solar.

O ciclo termodinâmico é utilizado para a geração de energia com combustíveis fósseis, sendo que nessas usinas, o calor é fornecido por meio da queima dos combustíveis, diferente de usinas heliotérmicas que absorvem o calor dos raios solares (PITZ-PAAL, 2017; UMMADISINGU; SONI, 2011; WEINSTEIN et al., 2015).

Dessa forma, para melhorar a consistência de uma usina heliotérmica, principalmente em lugares com radiação solar variante, é possível hibridizar a usina e adquirir energia térmica por meio de combustíveis, como biomassa. Isso permite que haja produção de energia elétrica durante 24 horas e também permite que a produção seja elevada caso a demanda aumente em determinados momentos (IEA, 2010; PITZ-PAAL, 2017).

A Figura 2.13 mostra uma possível produção diária de uma usina heliotérmica que possui um armazenamento térmico e é auxiliada por combustíveis. É possível visualizar que chega um momento em que não é possível mais obter energia dos raios solares, e passa-se a utilizar a energia armazenada durante o dia, porém, também pode se esgotar, necessitando do auxílio do combustível.

Figura 2.13 - Representação de produção de eletricidade em usina heliotérmica com armazenamento térmico e hibridização da produção.



Fonte: Adaptado de IEA (2010).

2.2.4. Forma de transferência de calor

A fim de que a energia térmica seja movimentada e transferida por todas as partes da usina, ou seja, para que o calor absorvido pelos receptores no campo solar seja acumulado no campo de armazenamento e seja levado para o campo de energia útil para geração de eletricidade é preciso que um fluido com propriedades compatíveis com as demais partes atue e integre os componentes (WEINSTEIN et al., 2015).

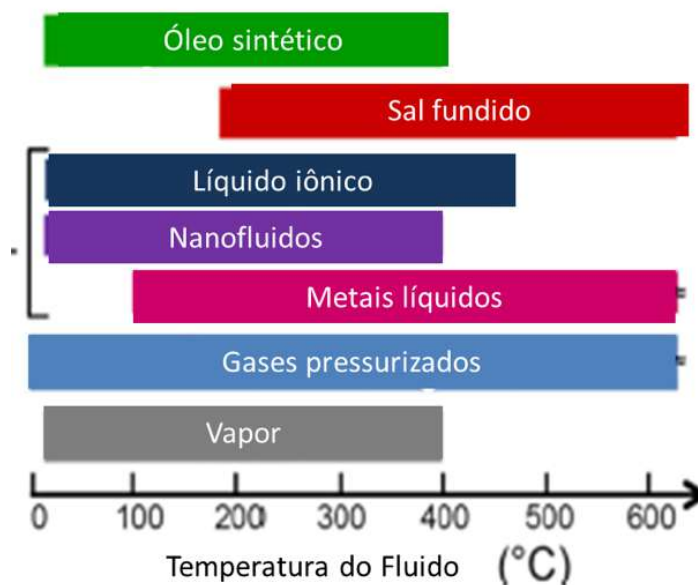
Então o fluido de transferência de calor é responsável por relacionar as três partes de uma usina heliotérmica e possibilitar a coleta, o transporte e a troca de calor nos processos, por meio da variação de sua temperatura que ocorre devido a trocas por convecção (WEINSTEIN et al., 2015).

O fluido de transferência precisa ter uma alta condutividade, para absorver o calor de forma eficiente, uma alta densidade e capacidade de calor específico para ter altos fluxos de calor com fluxos de massa razoáveis, e uma baixa viscosidade, permitindo baixa potência em seu bombeamento (WEINSTEIN et al., 2015).

Os fluidos mais utilizados para essas usinas são os sais fundidos e os óleos sintéticos. Os óleos possuem estabilidade na temperatura de operação comum em usinas, porém os sais trazem uma maior eficiência, por trabalharem em temperaturas mais altas e com isso, aumenta-se também os custos (WEINSTEIN et al., 2015).

Outros fluidos estão sendo estudados como: líquidos iônicos, nanofluidos, líquidos metálicos, gás pressurizados e vapor (WEINSTEIN et al., 2015). A Figura 2.14 traz a temperatura de operação suportada para cada tipo de fluido, sendo os metais líquidos, os sais fundidos e o gás pressurizado os de maior temperatura.

Figura 2.14 - Tipos de materiais utilizados para o fluido de transferência de energia e suas temperaturas de operação.



Fonte: Adaptado de Weinstein et al. (2015).

Uma outra forma de transportar o calor absorvido para o motor elétrico é por meio de um processo chamado geração de vapor direta (DSG), em que o vapor é gerado já no campo solar com a absorção de calor e levado ao campo de energia útil para a produção de eletricidade (ALHAYEK; AGELIN-CHAAB; REDDY, 2017). Dessa forma a usina não necessita de fluidos de transferência, simplificando a geração de eletricidade. Essa nova tecnologia, é vista como uma evolução no sistema e também pode ser utilizada em processos industriais como esterilização e dessalinização (SUN; LIU; HONG, 2015).

2.3. Condições de funcionamento

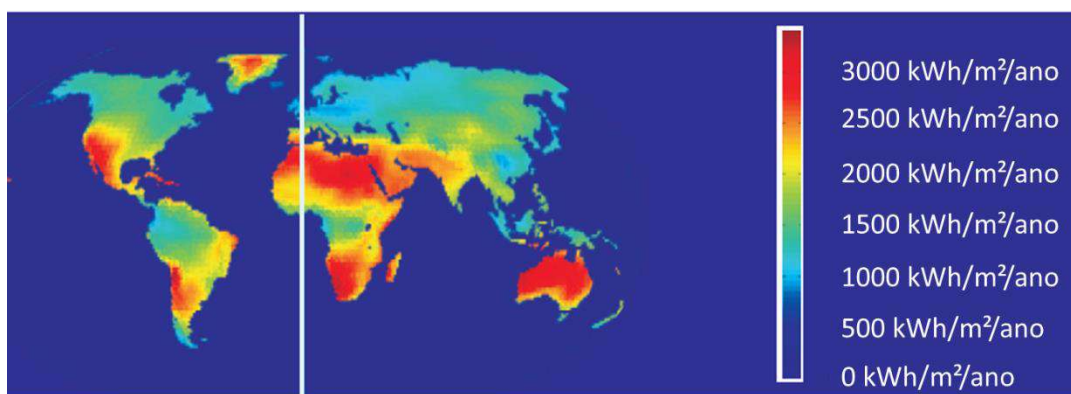
Uma usina heliotérmica absorve o calor do sol por meio da concentração dos raios solares em um receptor e com o calor é possível gerar energia elétrica. Essa radiação é medida de acordo com a irradiação normal direta (DNI), que são os raios solares perpendiculares a superfície, não sendo considerado os raios difusos (IEA,

2010; MEHOS; KABEL; SMITHERS, 2009). Somente a radiação direta normal é possível de direcionar e concentrá-la em um foco, para assim, ser absorvido uma elevada quantidade de calor (IEA, 2010).

O DNI serve de parâmetro para a análise e avaliação de locais de instalação em potencial, porém, a variação diária da radiação solar é o fator mais importante quanto a questão do recurso solar. Assim, é necessário um céu frequentemente limpo para ser confiável, e isso é visto principalmente em regiões quentes e semiáridas (IEA, 2010).

Há um parâmetro de uma radiação mínima de 1800 kWh/m²/ano já o torna a região com recurso solar suficiente para instalação de usinas heliotérmicas (ISLAM et al., 2018; MÜLLER-STEINHAGEN; TRIEB, 2004). Alguns autores sugerem um DNI maior, como uma média de 2000kWh/m²/ano (IEA, 2010; UMMADISINGU; SONI, 2011). De acordo com a *Internacional Energy Agency* (2010) as regiões em potencial para instalar usinas heliotérmicas são: África, Oriente Médio, Índia, Estados Unidos, México, Peru, Chile, China, Austrália, Turquia, sul da Europa, Ásia Central, Brasil e Argentina, a Figura 2.15 apresenta o mapa do mundo com os respectivos DNI.

Figura 2.15 - Representação do DNI dos países.



Fonte: Adaptado de IEA (2010).

Além do DNI, a quantidade de água e área disponível são importantes fatores ao analisar um local em potencial. É necessário uma quantidade de água de 4 m³/MWh (ISLAM et al., 2018).

Já a área necessária é preciso de 5 a 7 acres/MW, porém a área depende do tipo de tecnologia que será utilizada na usina, ou seja, depende da configuração do campo solar, do campo de armazenamento e do campo de energia útil. Usinas com torres solares ocupam uma área maior que as demais tecnologias disponíveis (ISLAM

et al., 2018). Deve-se ficar atento também com a adequação a localização da planta, pois estas não devem ser instaladas em regiões urbanas ou de preservação (MEHOS; KABEL; SMITHERS, 2009).

Outro fator de suma importância, é o custo da usina, cujas usinas heliotérmicas necessitam de grandes investimentos. Maior parte do custo de usinas com torres solares e com calhas parabólicas é devido aos campo solar e os elementos que o compõem, seguido do campo de energia útil (PITZ-PAAL, 2017).

2.4. Síntese da fundamentação teórica

A energia solar heliotérmica tem o seu princípio de funcionamento por meio da transformação da energia térmica em energia elétrica. O campo solar das usinas é composto por espelhos que direcionam e concentram a radiação solar em um foco, e nesse foco há um sistema que absorção do calor. Dessa forma a usina capta a energia térmica para iniciar o seu processo de geração de energia.

Para a concentrar a radiação solar existem quatro tipos de configurações diferentes: a calha parabólica, a torre solar, as lentes de Fresnel e o prato parabólico. Desses 4 o mais utilizado hoje é a calha parabólica, seguido da torre solar. Os diferentes tipos de concentrador possuem eficiência, consumo de água, área utilizada diferente. Assim, a escolha de um dos tipos de concentrador dependerá de decisões sistêmicas da usina.

Uma das principais vantagens da usina heliotérmica é a possibilidade de gerar energia mesmo quando não há recurso solar suficiente, por exemplo, após o pôr do sol. Isso é possível por meio do armazenamento térmico, em que o calor absorvido é armazenado e pode ser utilizado quando necessário. Por armazenar energia térmica e não elétrica como as demais formas de geração de energia por fontes renováveis, o custo se torna menos dispendioso, e acarreta na viabilidade da tecnologia.

Para gerar eletricidade, as usinas possuem turbinas que são movimentadas a partir do calor absorvido. Essa forma de geração é semelhante a usinas com fontes convencionais e possuem altas potências. A principal diferença é a forma de obtenção de calor, que no caso de usinas heliotérmicas, utiliza-se o recurso solar.

O recurso solar de determinado local é medido de acordo com o DNI, a radiação direta normal, que possibilita a concentração dos raios em um foco central.

Estudos mostram que um local com DNI de 1800-2000 kWh/m²/ano é adequado para o funcionamento dessas usinas.

Finalmente, este capítulo forneceu ao trabalho as bases teóricas e possibilitou o conhecimento das opções tecnológicas e das condições climáticas e geográficas mais adequadas para a sua implantação. No próximo capítulo será descrito o método da pesquisa, na qual será abordado a descrição detalhada do procedimento no levantamento e análise de informações.

Capítulo 3 – MÉTODO DA PESQUISA

Neste capítulo será abordado o método da pesquisa, que se divide em dois tópicos: o primeiro mostrará como a pesquisa é caracterizada, quanto ao propósito, aos procedimentos técnicos, à abordagem, à argumentação lógica, à finalidade, ao desenvolvimento do tempo e à natureza; e o segundo trará as etapas seguidas no seu desenvolvimento.

3.1. Caracterização da pesquisa

A caracterização da pesquisa promove o entendimento melhor de como foi executada e possibilita a comparação com as demais. O Quadro 3.1, apresenta a caracterização da pesquisa de acordo com sete critérios.

Quadro 3.1 – Caracterização da pesquisa.

| Critério | Classificação/Tipo | Escolha |
|---|---------------------------|----------------|
| Propósito (YIN, 2003) | Exploratória | |
| | Descritiva | √ |
| | Explicativa | |
| Procedimentos técnicos (GIL, 1991) | Pesquisa bibliográfica | √ |
| | Pesquisa documental | |
| | Pesquisa experimental | |
| | Ex-post-facto | |
| | Levantamento | |
| | Estudo de caso | √ |
| | Pesquisa-ação | |
| | Pesquisa participante | |
| Abordagem (CRESWELL, 2003) | Quantitativo | |
| | Qualitativo | |
| | Qualitativo-quantitativo | √ |
| Finalidade (FONTELLES et al, 2009) | Básica | √ |
| | Aplicada | √ |
| Desenvolvimento no tempo (FONTELLES et al, 2009) | Transversal | √ |
| | Longitudinal | |
| Natureza (FONTELLES et al, 2009) | Observacional | √ |
| | Experimental | |

Fonte: Elaboração própria.

A pesquisa é caracterizada de acordo com o propósito (YIN, 2003), como descritiva, tendo como objetivo além de promover a compreensão de um problema pouco explorado, amplo e desconhecido, descrever as características das usinas e das condições no RN.

A pesquisa inova em analisar dados das usinas e das condições ambientais e geográficas de locais com usinas já em operação, para em seguida comparar com as características do Estado brasileiro. Com isso, torna-se um estudo-piloto para demais pesquisas que venham a surgir posteriormente.

De acordo com os procedimentos técnicos (GIL, 1991), é caracterizada como uma revisão bibliográfica e como um estudo de caso, pois busca resolver a questão por meio de referências já publicadas e investiga-se um caso específico e aspectos da realidade. Os objetivos deste trabalho foram alcançados a partir do conhecimento apresentado em artigos, relatórios mundiais, dados reais sobre usinas heliotérmicas e sobre o RN.

Já quanto a abordagem da pesquisa (CRESWELL, 2003), caracteriza-se como qualitativa-quantitativa, pois é feito uma análise das características ambientais e geográficas das usinas heliotérmicas do mundo e utiliza-se uma análise quantitativa para analisar a frequência de tais características em diferentes tipos de usinas.

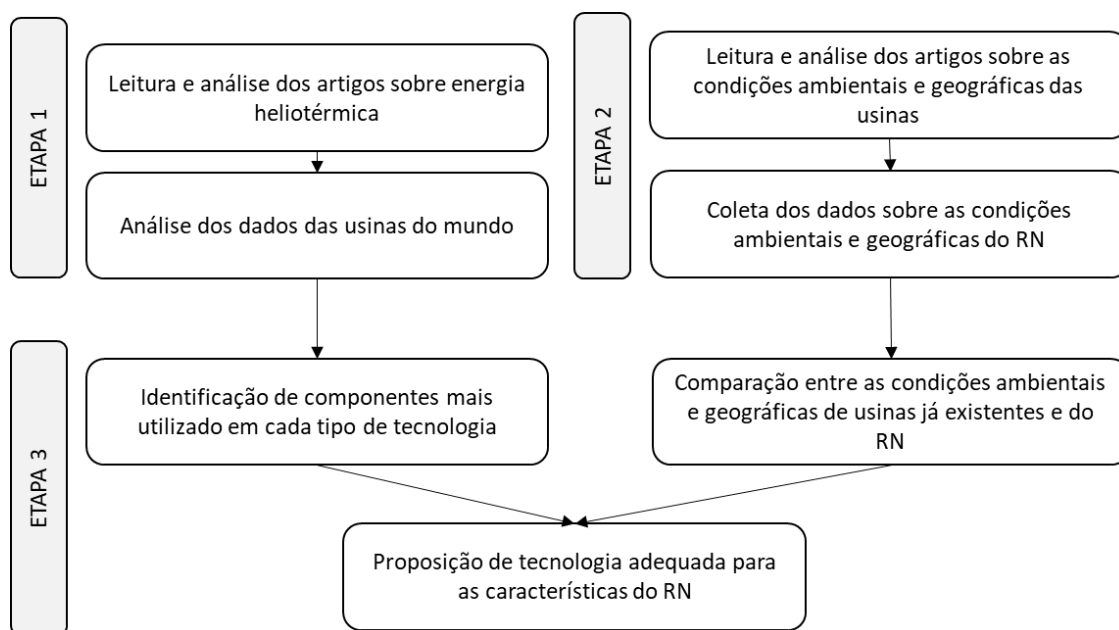
A pesquisa quanto a finalidade (FONTELLES et al., 2009) trata-se de uma pesquisa básica e aplicada. Aplicada, pois possui o objetivo de resolver uma questão prática, porém com os seus resultados ainda não é possível aplicá-la, sendo necessários mais pesquisas para que isso seja efetivo. Dessa forma, gera novos conhecimentos para o avanço da energia heliotérmica em âmbito mundial considerando-a básica.

O desenvolvimento no tempo (FONTELLES et al., 2009) é caracterizado como transversal, pois a pesquisa é realizada em um determinado momento, sendo uma análise dos dados até o dado momento da pesquisa. E a natureza da pesquisa (FONTELLES et al., 2009) é observacional, tendo em vista que o autor apenas observa os fatos acontecidos, não há interferência nos resultados.

3.2. Etapas da pesquisa

A pesquisa foi desenvolvida em três etapas. Nas duas primeiras etapas houve sobreposição e a terceira só foi iniciada após a finalização das duas anteriores, conforme mostra a Figura 3.1.

Figura 3.1 – Etapas da pesquisa.



Fonte: Elaboração própria (2018).

A primeira etapa envolveu duas sub-etapas: (a) leitura e análise de artigos e relatórios sobre usinas heliotérmicas e (b) análise dos dados das usinas no mundo.

A primeira sub-etapa objetivou entender os princípios, o funcionamento, e as tecnologias utilizadas pela usina, por meio da leitura dos artigos e coleta de informações relevantes, que promoveram um melhor entendimento do assunto. Foi necessário informações sobre como é concentrado e absorvido o calor, como ele pode ser armazenado e como pode ser transformado em energia elétrica. Além disso, foram explicitados os tipos de tecnologias que podem ser utilizadas em cada processo.

A segunda sub-etapa foi analisada os dados de todas as usinas comerciais no mundo, tanto em fase de desenvolvimento, de construção, ainda sem operação e já em operação, e com isso, foram excluídos dados de usinas de demonstração e projetos pilotos, já que seus dados poderiam distorcer a conclusão da pesquisa.

A análise foi baseada na relação dos fatores escolhidos – como tipo do fluido de transferência, tipo do sistema de armazenamento, tipo do ciclo termodinâmico, entre outros - e o tipo de concentrador utilizado pela usina – calha parabólica, lentes de Fresnel, torre solar ou prato parabólico -, sendo possível comparar os fatores para as diferentes tecnologias. Caso, alguma usina não houvesse informação sobre determinado fator, esta seria excluída da análise deste fator, podendo ser considerada na análise de outro.

A segunda etapa do trabalho resume-se em duas sub-etapas semelhante a primeira etapa, porém com um foco para as condições climáticas e geográficas, sendo elas: (a) leitura e análise de artigos e relatórios sobre usinas heliotérmicas e (b) coleta dos dados sobre o Rio Grande do Norte.

A primeira sub-etapa pode-se reunir informações sobre as condições climáticas e geográficas consideradas adequadas a usinas heliotérmicas, como a radiação solar mínima viável. Isso foi possível por meio da leitura de artigos e relatórios, com a identificação das constatações procuradas.

Já a segunda sub-etapa se deu por meio da coleta de dados em diferentes bases sobre o RN, sendo utilizado dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), do Solargis, de artigos relacionados ao RN, e outros sítios eletrônicos com dados de interesse.

Por fim, a terceira etapa do trabalho faz-se conclusões das informações obtidas nas partes anteriores, sendo assim, feita a identificação dos componentes mais utilizados para cada tipo de concentrador e feito a comparação entre as condições necessárias para o funcionamento de uma usina heliotérmica e as condições que o RN possui. Com isso, foi possível chegar ao objetivo esperado, propor uma sugestão da tecnologia que melhor se adegue ao RN.

Esta etapa foi feita com o auxílio dos mapas do RN com informações sobre os municípios, sobre a radiação solar e sobre o nível pluviométrico, e ainda com a utilização da Tabela com informações sobre os componentes mais utilizados de acordo com a tecnologia de concentração.

3.3. Síntese do método da pesquisa

A pesquisa é caracterizada quanto ao propósito como descritiva, quanto aos procedimentos técnicos é uma pesquisa bibliográfica e um estudo de caso. A abordagem é qualitativa-quantitativa, a finalidade é básica e aplicada, a sua natureza é observacional e quanto ao desenvolvimento no tempo é transversal.

A realização da pesquisa é dividida em três etapas. A primeira estuda o funcionamento de usinas heliotérmicas e descreve as usinas do mundo. A segunda etapa descreve as condições ambientais e geográficas para o funcionamento da usina heliotérmicas e as condições existentes no RN. E a terceira etapa é a conclusão das

demais etapas e da pesquisa, em que analisa os dados das usinas no mundo, compara as condições necessárias com as do RN. E por fim, sugere-se uma opção tecnológica mais adequada ao RN.

Dessa forma, este capítulo descreve a pesquisa, caracterizando-a e detalhando os procedimentos para a sua conclusão. No próximo capítulo, será descrito os dados adquiridos das usinas no mundo e são apresentadas as características do RN.

Capítulo 4 – DESCRIÇÃO DOS DADOS ANALISADOS

Neste capítulo são apresentados os dados relevantes das usinas heliotérmicas no mundo, analisando cada característica de acordo com o tipo de concentrador utilizado; e apresentados dados sobre o Estado do RN, como a radiação solar, o nível pluviométrico, os tipos de clima, entre outros.

4.1 Descrição das usinas heliotérmicas no mundo

Uma usina heliotérmica possui quatro tipos diferentes de concentradores: a calha parabólica, a torre solar, as lentes de Fresnel e o prato parabólico. O concentrador é uma das partes mais importantes, pois é o componente que direciona o calor, e com isso outros fatores dependem dessa escolha.

Foram utilizados dados sobre usinas heliotérmicas no mundo e analisado fatores relevantes que são utilizados em cada usina, comparando com o tipo de concentrador utilizado. Permitindo, assim, ter informações de usinas reais, ter um entendimento melhor do funcionamento e as características das usinas e comparar as informações de artigos científicos com dados da realidade.

Os dados das usinas foram adquiridos do banco de dados do Laboratório Nacional de Energias Renováveis (*National Renewable Energy Laboratory - NREL*), um laboratório do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América. O banco de dados traz 91 dados das usinas. Por meio da pesquisa bibliográfica foi possível identificar as características e as tecnologias mais relevantes para a usina heliotérmica. Assim, para a análise foram utilizados os dados apresentados no Quadro 4.1. Essa análise dos dados permite ter uma visão do cenário real das usinas heliotérmicas no mundo, que servirão de referência para decisões de projetos futuros de usinas heliotérmicas.

Quadro 4.1 – Dados das usinas heliotérmicas utilizados.

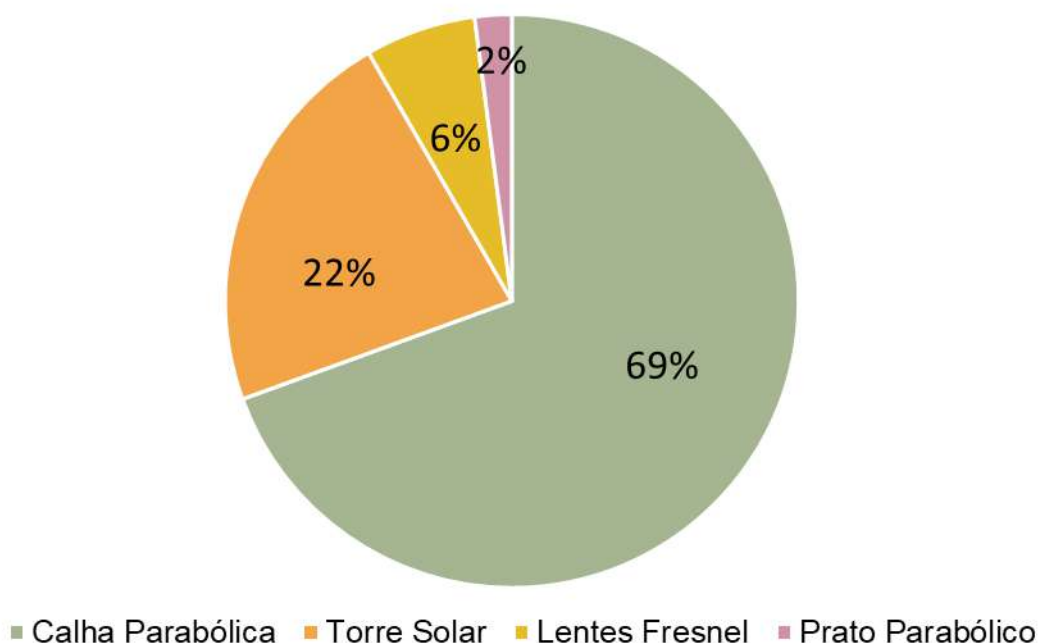
| DADOS |
|---------------------------------|
| Nome da Usina |
| Tipo do Projeto |
| Tecnologia de Concentrador |
| Status |
| País |
| Recurso Solar |
| Área |
| Empregos na Construção por ano |
| Empregos Operacional por ano |
| Tipo do Fluido de Transferência |
| Tipo do Armazenamento |
| Horas de Armazenamento |
| Ciclo Termodinâmico |
| Capacidade Bruta da Turbina |
| Geração de Eletricidade |

Fonte: Adaptado de NREL (2018).

A base de dados traz informações de usinas de demonstração, que são utilizadas para pesquisas, como usinas comerciais. O foco do trabalho é a análise de usinas comerciais, e para isso, foram excluídas da análise dados sobre usinas de demonstração.

Com os dados foi possível observar que a calha parabólica é a tecnologia mais utilizada nas usinas, existindo 100 usinas com essa tecnologia, a torre solar é a segunda mais utilizada, com 32 usinas, e depois as lentes Fresnel e o prato parabólico, com 9 e 3 usinas, respectivamente, como representado na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Participação das tecnologias de concentrador entre as usinas heliotérmicas.



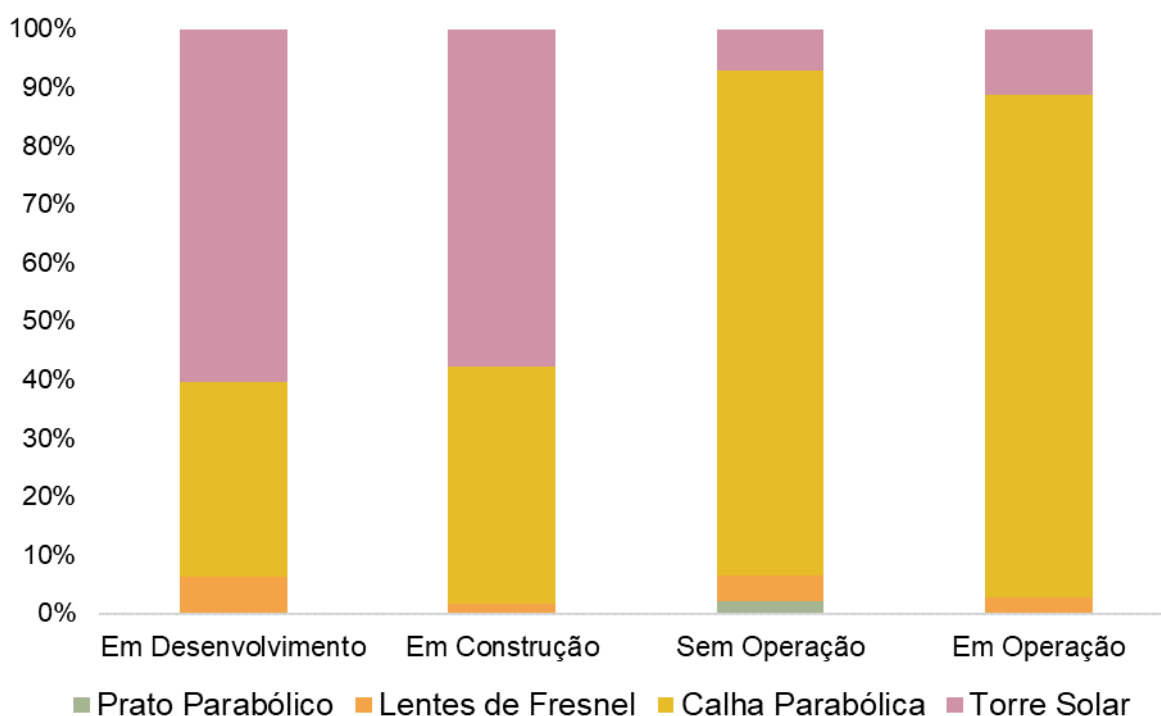
Fonte: Elaboração própria (2018).

Dessas usinas apresentadas, foram consideradas usinas em demonstração, em construção, ainda sem operação, e em operação. Para analisar melhor foi considerado a potência de cada usina e o seu *status*, como é mostrado na Figura 4.2.

A maior porcentagem da potência das usinas em operação é do tipo calha parabólica, mas há usinas de torre solar e de lentes de Fresnel. Somente usinas com prato parabólico que não há em operação, mas sim em desenvolvimento e outras ainda sem operação.

Na Figura 4.2 é mostrado, também, uma tendência em usinas com tecnologia de torre solar, já que são maioria entre as usinas em desenvolvimento e as em construção.

Figura 4.2 - Gráfico da porcentagem da potência (MW) e *status* das usinas para cada tecnologias.

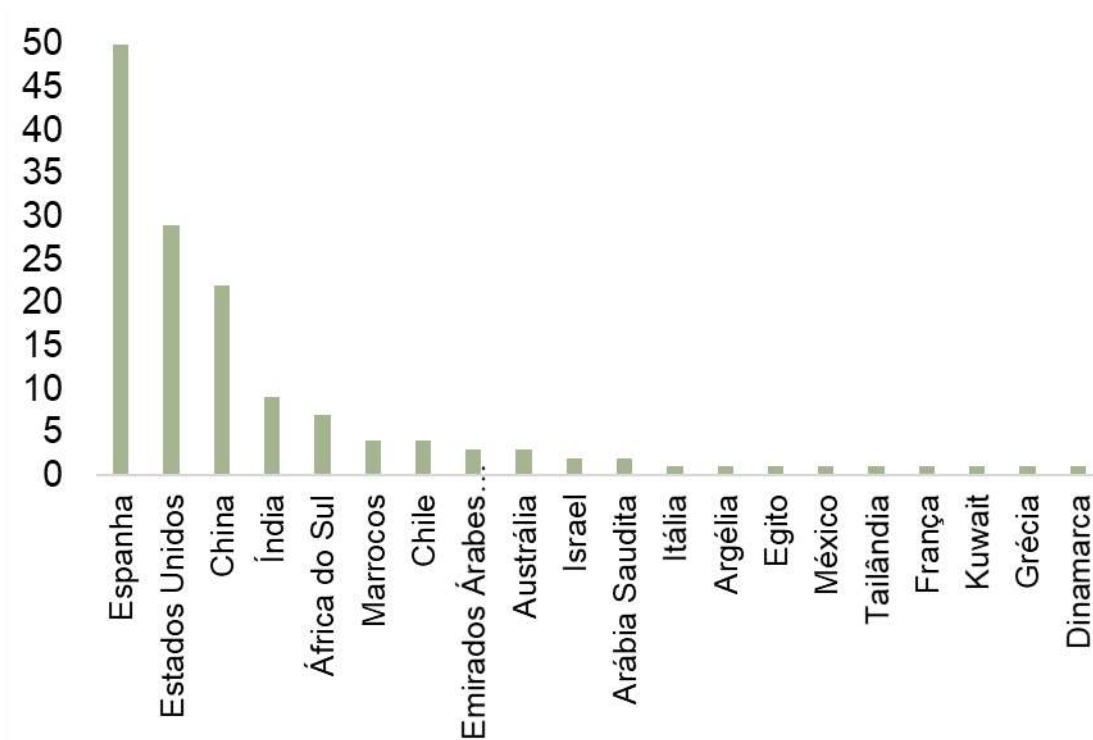


Fonte: Elaboração própria (2018).

A Figura 4.3 apresenta a quantidade de usinas em cada país, sendo a Espanha o país que mais possui usinas, contando com 50. Após, vem os Estados Unidos com 29 usinas e a China com 22 usinas. Também, vê-se que há usinas em 20 países, em 6 continentes: Europa, América do Norte, Ásia, África, América do Sul e Oceania.

Considerando a região do Oriente Médio e o Norte da África (MENA), dita com grande potencial para instalação de usinas heliotérmicas (IEA, 2010) tem-se que esta região é a quarta maior em quantidade de usinas, atrás da Espanha, Estados Unidos e China.

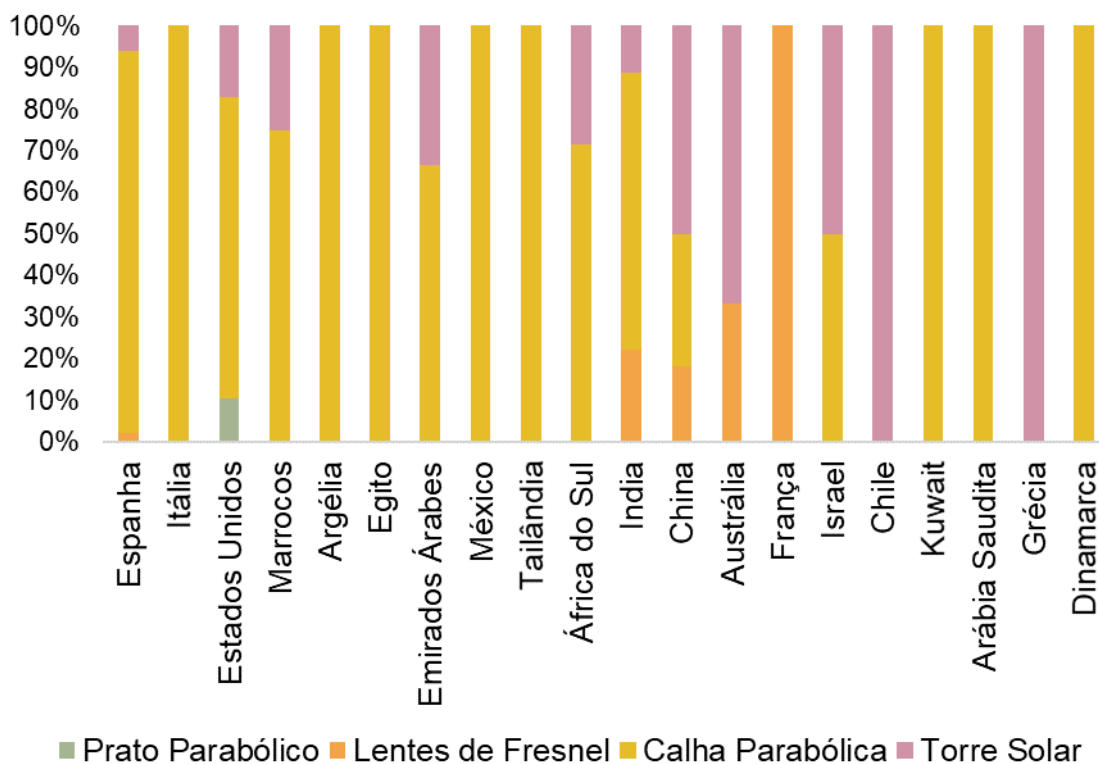
Figura 4.3 - Quantidade de usinas heliotérmicas por país.



Fonte: Elaboração própria (2018).

A Figura 4.4 mostra as tecnologias utilizadas em cada país e tem-se que a principal tecnologia é a calha parabólica. Na Espanha também é majoritária e vê-se a presença da torre solar. Os países que não possuem a calha parabólica são: Austrália, França, Chile e Grécia. As lentes de Fresnel estão presentes em quatro países - Índia, China, Austrália e França, e o prato parabólico em apenas um, os Estados Unidos.

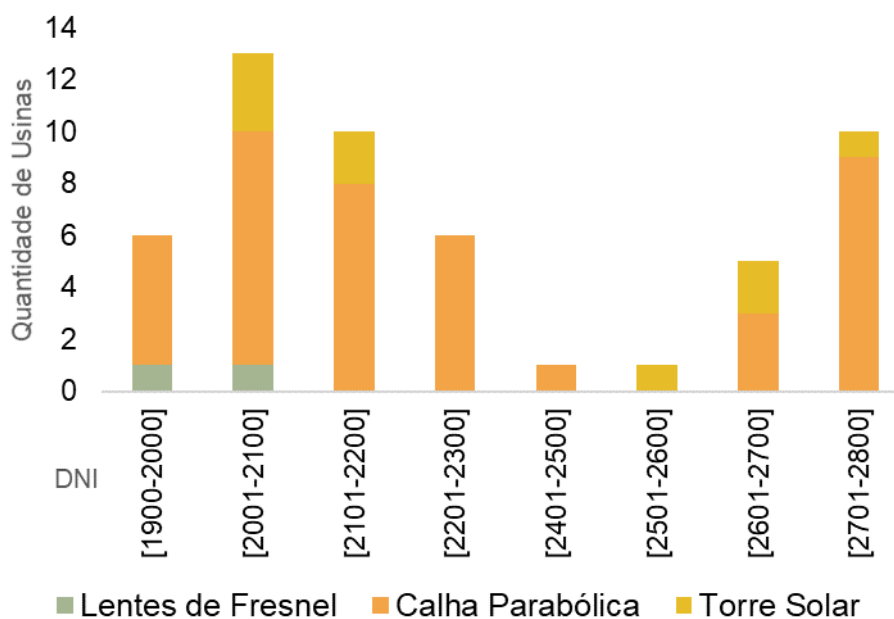
Figura 4.4 - Gráfico da porcentagem de cada tecnologia de usinas heliotérmicas em cada país.



Fonte: Elaboração própria (2018).

No que diz respeito ao recurso solar (DNI), a Figura 4.5 apresenta a presença dos tipos de tecnologia em diferentes intervalos de DNI. Observou-se um limite mínimo de 1900 kWh/m²/ano e um limite máximo de 2800 kWh/m²/ano. Dentre a tecnologia de calha parabólica, há nove usinas com DNI de 2701 a 2800 kWh/m²/ano, e nove usinas com 2001 a 2100 kWh/m²/ano.

Já quanto usinas com torres solares, também não houve uma maioria, tendo 1, 2 ou 3 usinas com limites de 2001 a 2800 kWh/m²/ano. O que pode ser ressaltado é que não há usinas de torre solar com menos de 2001 kWh/m²/ano. A análise para usinas com lentes de Fresnel, foi visto um limite de 1900 a 2100 kWh/m²/ano. Também não há uma maioria em determinado intervalo. Para usinas com pratos parabólicos não há dados.

Figura 4.5 - Número de usinas para intervalos de recurso solar por kWh/m²/ano.

Fonte: Elaboração própria (2018).

Para entender a relação entre a quantidade de recurso solar e a quantidade de energia elétrica produzida foi realizada a correlação entre os dois fatores. A correlação representa a relação direta ou indiretamente proporcional entre os fatores, quanto mais próximo de 1 ou -1, mais forte a correlação dos dados, e próximo de 0, não há correlação (LEVINE et al., 2005).

Para entender a relação entre a quantidade de recurso solar e a quantidade de energia elétrica produzida, foi considerada uma relação linear e vista a correlação entre os dois fatores, apresentado na Tabela 4.1. O coeficiente ρ indica a porcentagem de quanto as variáveis são proporcionais entre si, quanto mais próximo de 1 a relação é diretamente proporcional, quanto mais próxima de -1 é inversamente proporcional, e próximo de 0, não há correlação (LEVINE et al., 2005). Já o R^2 , indica o quanto a variação da eletricidade é devido à variação do DNI (GUJARATI, 2006; LEVINE et al., 2005).

Para a calha parabólica, 16% da variação da produção elétrica pode ser explicada com a variação do DNI. Neste caso, foi mostrado que quanto menor o DNI, maior a produção. Já para a torre solar, a variação da eletricidade é explicada 35% pela variação do DNI e para as lentes de Fresnel, 100%.

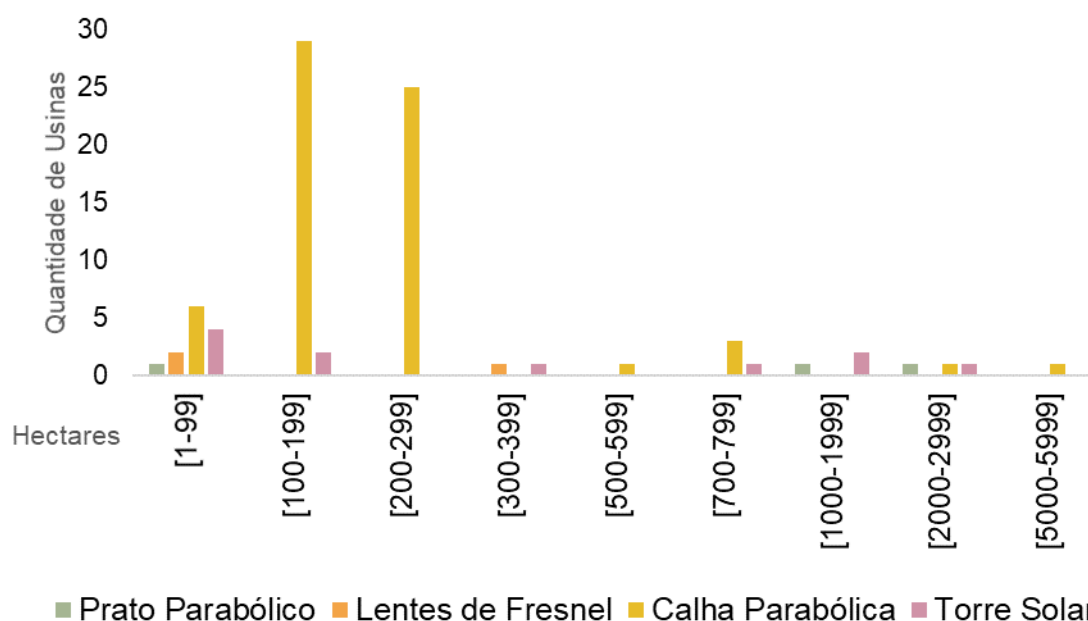
Tabela 4.1- Dados da correlação entre o DNI e a produção elétrica.

| Dados | ρ | R^2 |
|-------------------|--------|-------|
| Calha Parabólica | -0,4 | 0,16 |
| Torre Solar | 0,59 | 0,35 |
| Lentes de Fresnel | 1 | 1 |
| Todas | 0,38 | 0,14 |

Fonte: Elaboração própria (2018).

Outro fator relevante é a área utilizada pelas usinas heliotérmicas, em que foram considerados os dados em hectares, mostrados na Figura 4.6. Para usinas com calha parabólica, a maioria possui de 100 a 299 hectares, mas há usinas com menos de 100 hectares e outras com mais de 500 hectares, com a maior tendo entre 5000 a 5999 hectares.

Figura 4.6 - Quantidade de usinas para intervalos de área por hectares.



Fonte: Elaboração própria (2018).

Já para usinas com torres solares, há usinas com menos de 100 hectares e até 2999 hectares, sendo a maioria usinas pequenas com menos de 100 hectares. Quanto a usinas com lentes de Fresnel, há usinas com menos de 100 hectares e usinas com mais de 300 e menos de 400 hectares. E para usinas com prato parabólico há usina com menos de 100 hectares, com mais de 1000 e menos de 3000 hectares.

Para analisar a relação entre o tamanho da área e a produção das usinas foi feita a correlação entre esses dois fatores considerando uma relação linear, como apresentada na Tabela 4.2. Para a calha parabólica, 41% da variação da geração de eletricidade é explicada pela variação da área utilizada, para a torre solar 88% e para as lentes de Fresnel 100% (acredita-se que a pequena quantidade de dados referentes a essa tecnologia levou a uma correlação forte).

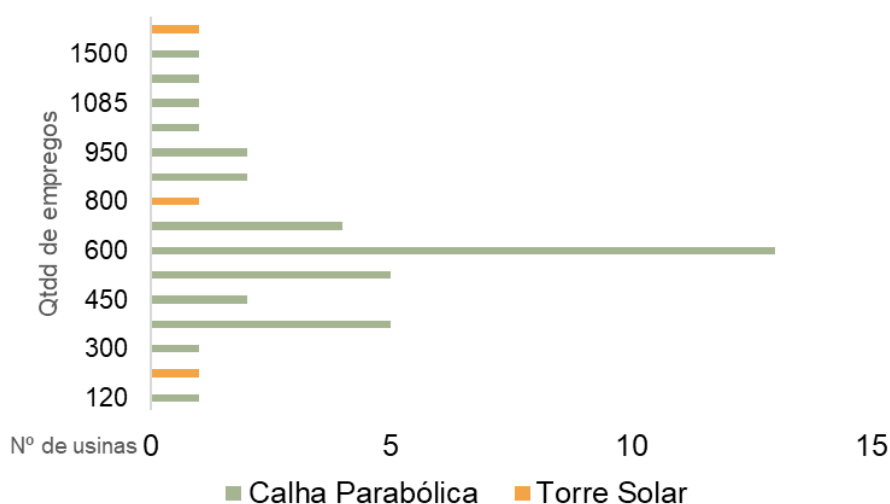
Tabela 4.2 - Dados da correlação entre a área e a produção elétrica.

| Dados | ρ | R^2 |
|-------------------|--------|-------|
| Calha Parabólica | 0,64 | 0,41 |
| Torre Solar | 0,94 | 0,88 |
| Lentes de Fresnel | 1 | 1 |
| Todas | 0,81 | 0,65 |

Fonte: Elaboração própria (2018).

Outro dado disponível na base é a quantidade de empregos ofertados anualmente na construção das usinas pela quantidade de usinas, mostrado na Figura 4.7, e a quantidade ofertada durante o funcionamento das usinas pela quantidade de usinas, mostrado na Figura 4.8. A maioria das usinas propiciam aproximadamente 600 empregos durante a construção, mas há usinas que necessitaram de mais de 1500 pessoas nesta fase.

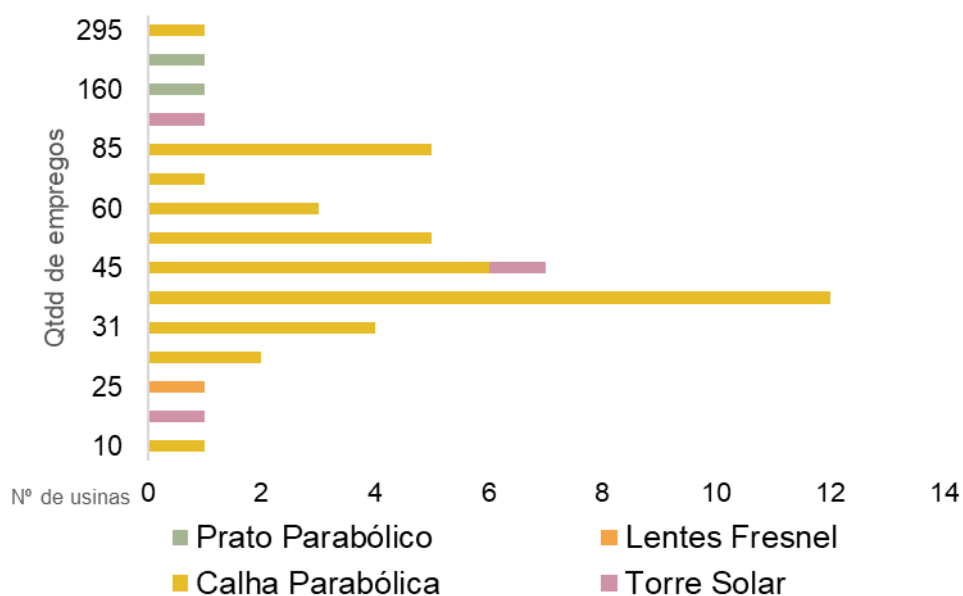
Figura 4.7 - Gráfico da quantidade de empregos necessários na fase de construção das usinas.



Fonte: Elaboração própria (2018).

E para empregos na operação das usinas pode chegar a necessitar de aproximadamente 300 pessoas trabalhando, mas a maioria necessita de aproximadamente 40 pessoas.

Figura 4.8 - Gráfico da quantidade de empregos necessários em usinas em operação.

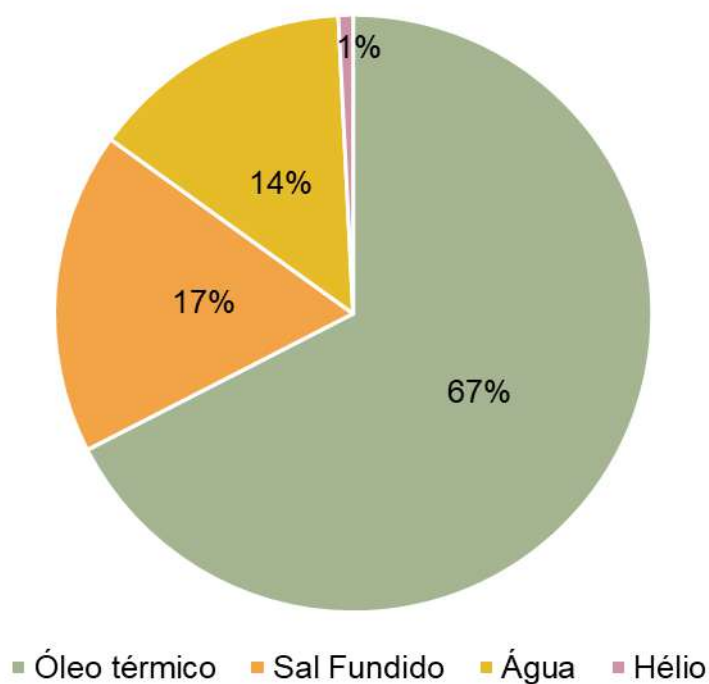


Fonte: Elaboração própria (2018).

Uma usina é composta resumidamente por 5 componentes: o concentrador, o absorvedor, o fluido de transferência de calor, o armazenamento térmico e o motor elétrico. Dentre esses componentes existem tipos diferentes de cada um deles, e por isso, é preciso analisar a usina de uma forma sistêmica, e saber quais tecnologias de cada componente são compatíveis entre si.

A Figura 4.9 traz informações referente ao tipo de fluido de transferência. O óleo térmico é o mais utilizado em usinas, tendo 67% de participação, depois é o sal fundido com 17% de participação, em seguida a água com 14% e, por último, o hélio com apenas 1%.

Figura 4.9 - Tipo de fluidos de transferência térmica utilizados em usinas.

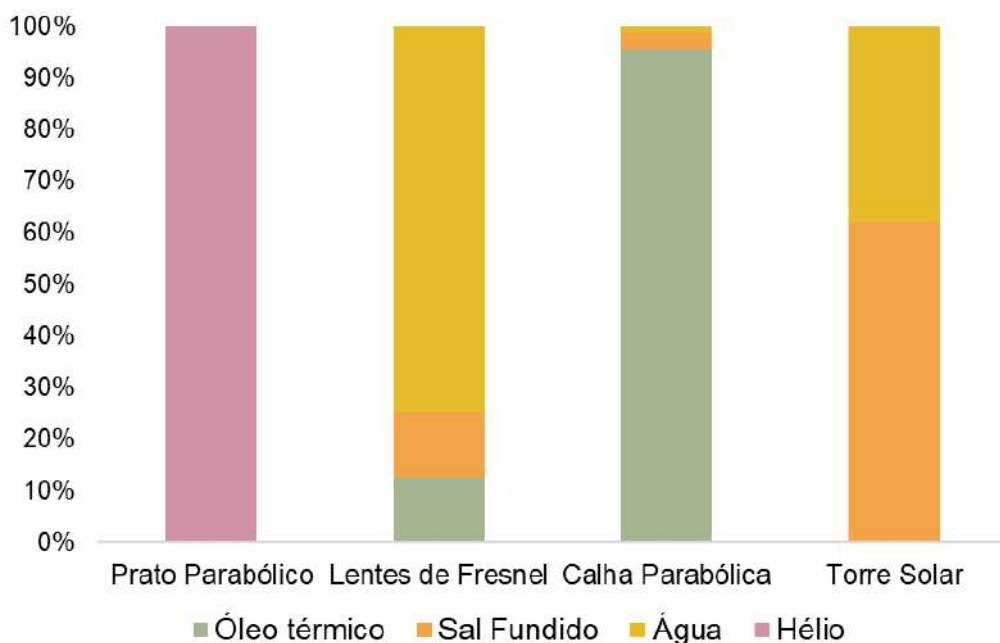


Fonte: Elaboração própria (2018).

Em uma análise mais minuciosa, pode ser detalhado o fluido de transferência mais utilizado por cada tipo de tecnologia, como apresentado na Figura 4.10. Para o prato parabólico, apenas o hélio é utilizado. Para as lentes de Fresnel, há uso de óleo térmico, sal fundido e água, sendo este o mais utilizado.

Para calhas parabólicas, o fluido mais utilizado, em quase 100% das usinas é o óleo térmico, mas há o uso de sal fundido e de água das usinas, em 3% e em 1%, respectivamente. Já para a torre solar, é utilizado em maioria o sal fundido, mas também é utilizado a água, em 38%.

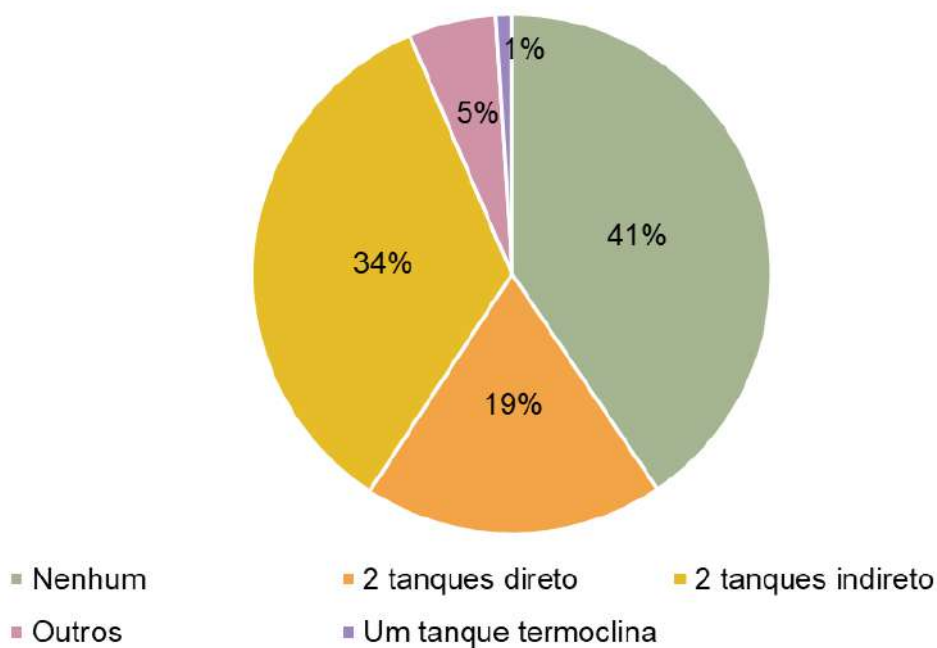
Figura 4.10 - Fluidos de transferência térmica em usinas por cada tipo de tecnologia.



Fonte: Elaboração própria (2018).

A Figura 4.11 mostra os tipos de sistema de armazenamento térmico, que pode ser um tanque, dois tanques direto, dois tanques indireto, outro tipo, ou nenhum tanque. A maioria das usinas não possuem armazenamento térmico, as que possuem, a maioria tem 2 tanques indiretos, e poucas possuem com um tanque termoclina.

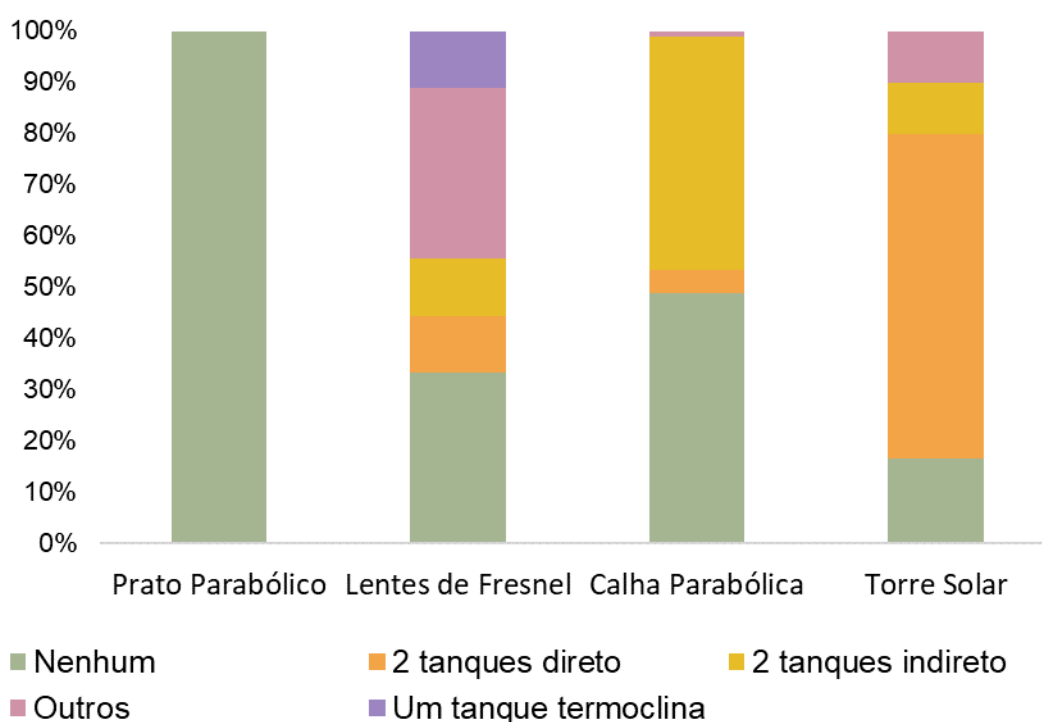
Figura 4.11 - Sistemas de armazenamento térmico em usinas heliotérmicas.



Fonte: Elaboração própria (2018).

A análise, de acordo com o tipo de tecnologia utilizado, apresentada na Figura 4.12, mostra que para o prato parabólico, o armazenamento utilizado é o de 2 tanques direto. Já para as lentes Fresnel possuem as cinco categorias descritas, sendo o único que utiliza armazenamento com 1 tanque termoclina. Para a calha parabólica é utilizado armazenamento de dois tanques como maioria, mas também não é utilizado armazenamento ou é outro tipo. E quanto a torre solar tem como maioria outros tipos não descritos, mas também há com 2 tanques ou sem armazenamento.

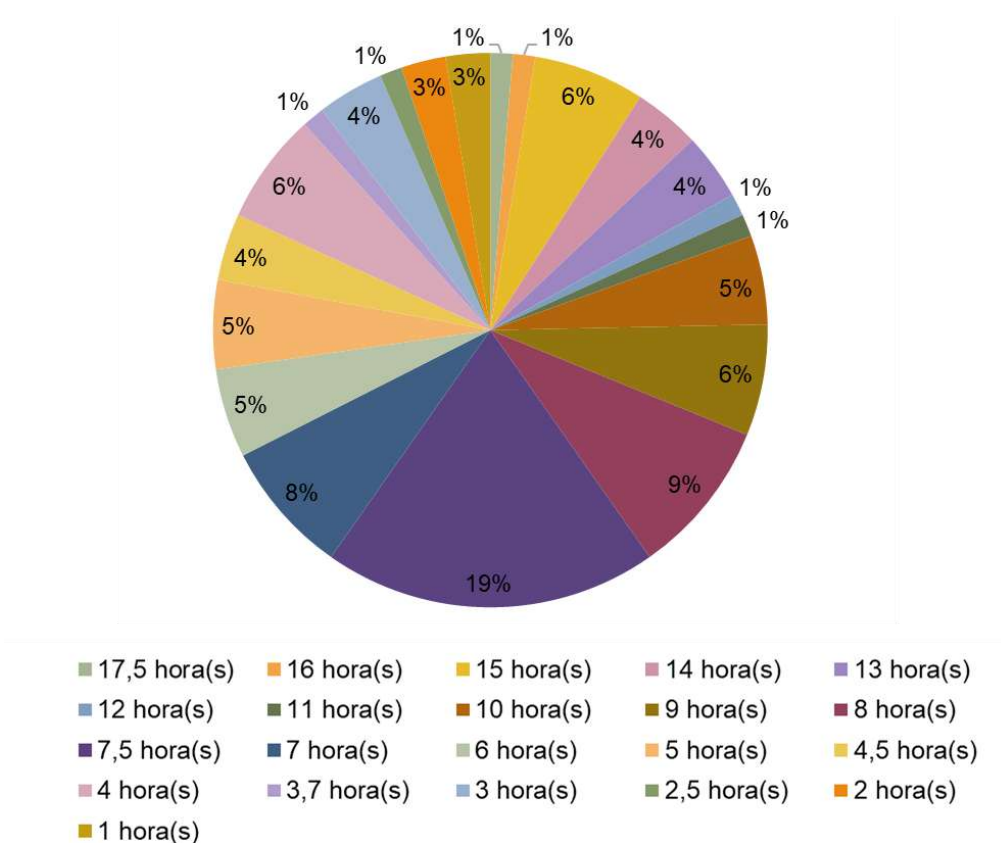
Figura 4.12 - Sistemas de armazenamento térmico em usinas por tipo de tecnologia.



Fonte: Elaboração própria (2018).

Outro dado relevante quanto ao armazenamento é a quantidade de horas que o armazenamento consegue acumular, como mostrado na Figura 4.13. Existem armazenamentos de apenas 1 hora, como de 17,5 horas, sendo a maioria de 7,5 horas de energia acumulada.

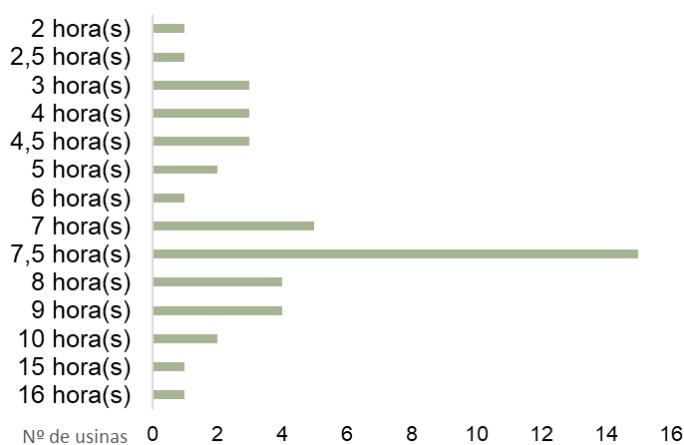
Figura 4.13 - Percentagem de horas de energia térmica armazenada em usinas.



Fonte: Elaboração própria (2018).

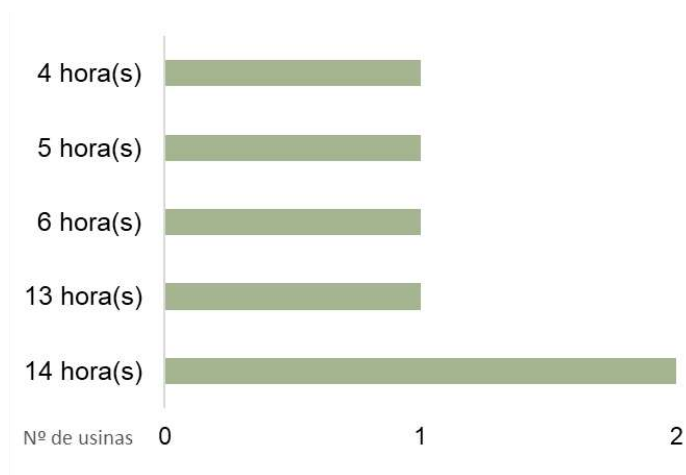
Para usinas com calhas parabólicas, há armazenamento de 2 a 16 horas, sendo a mais utilizada a de 7,5 horas. Para as lentes de Fresnel, há armazenamento de 4 a 14 horas. Já para usinas com torre solar há armazenamento de 1 a 17,5 horas, sendo os mais utilizados os de 15 e os de 8 horas, como mostrado nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16.

Figura 4.14 - Horas acumuladas no armazenamento para calha parabólica.



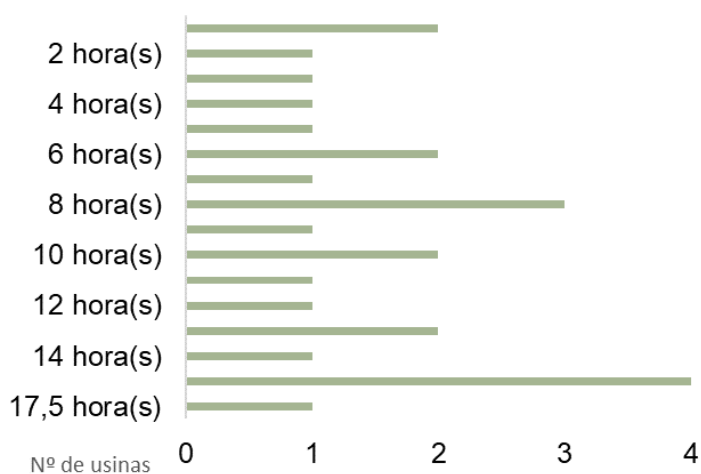
Fonte: Elaboração própria (2018).

Figura 4.15 - Horas acumuladas no armazenamento para lentes de Fresnel.



Fonte: Elaboração própria (2018).

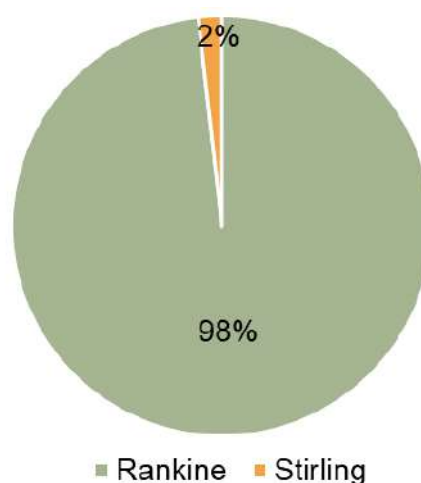
Figura 4.16 - Horas acumuladas no armazenamento para torre solar.



Fonte: Elaboração própria (2018).

O ciclo termodinâmico também pode variar sendo ciclo Rankine ou Stirling, como mostrado na Figura 4.17. O ciclo Brayton também é estudado, porém nenhuma das usinas analisadas o utilizava. O ciclo Rankine é o mais utilizado, por 98% das usinas e o Stirling é apenas por 2% das usinas.

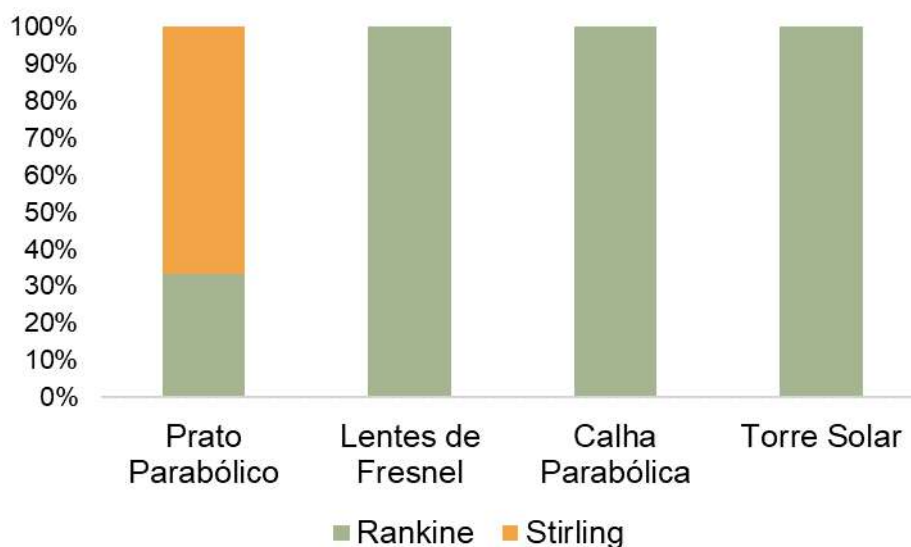
Figura 4.17- Porcentagem dos ciclos termodinâmicos em usinas.



Fonte: Elaboração própria (2018).

Já na Figura 4.18 é apresentado a comparação dos ciclos termodinâmicos em relação ao tipo de tecnologia utilizada na usina, tendo que todos eles utilizam o ciclo Rankine. Somente o prato parabólico, além do Rankine utiliza também o Stirling, que representa mais de 60%.

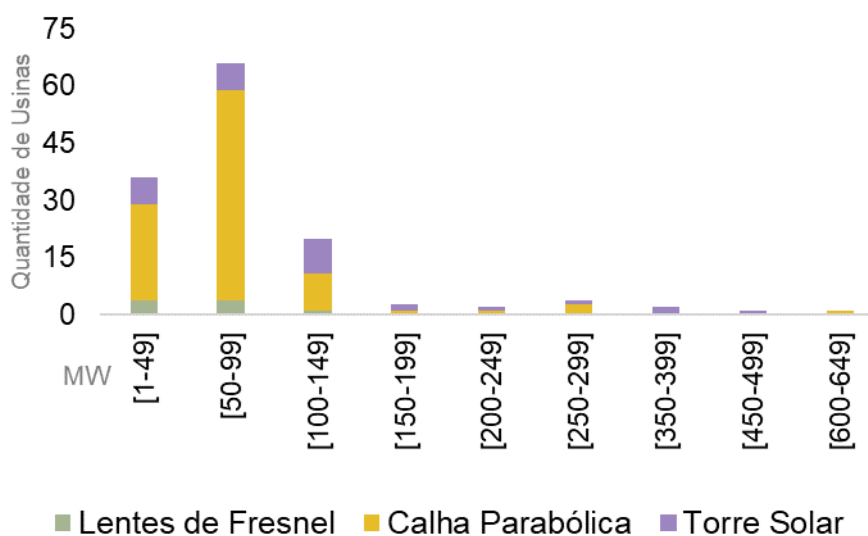
Figura 4.18 – Tipos de ciclo termodinâmico para cada tecnologia.



Fonte: Elaboração própria (2018).

A potência da usina pode ser medida a partir da capacidade da turbina utilizada na usina. Na Figura 4.19 é possível visualizar que a maioria das usinas possuem uma capacidade de 50 MW e desta composição a maioria é de calha parabólica, mas há usinas de lentes de Fresnel e de torre solar. Também, afirma-se que existem usinas com menos de 50 MW e usinas com 600 MW.

Figura 4.19 - Capacidade da turbina em MW por quantidade de usinas.

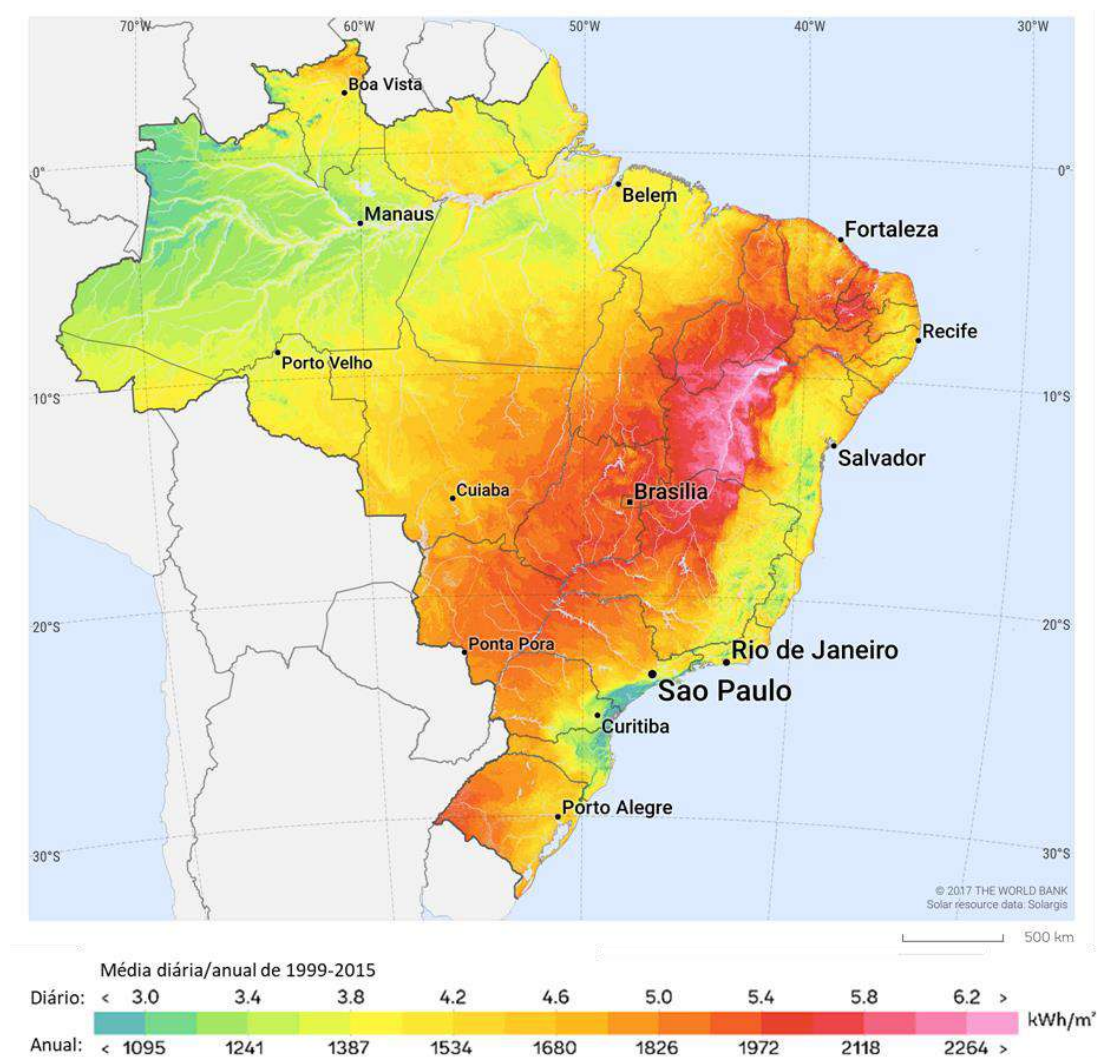


Fonte: Elaboração própria (2018).

4.2 Descrição do Rio Grande do Norte

O Brasil está situado no hemisfério sul, com fronteira com o Oceano Atlântico e outros 10 países, possui uma área de 8.515.759,090 km² (IBGE, 2018), e é composto por 26 estados e o distrito federal. Quanto a radiação solar no país, a figura 4.20 mostra áreas e seus respectivos DNI, e com um nível elevado nos estados: Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, Tocantins, Piauí, Maranhão, Ceará, Bahia, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte.

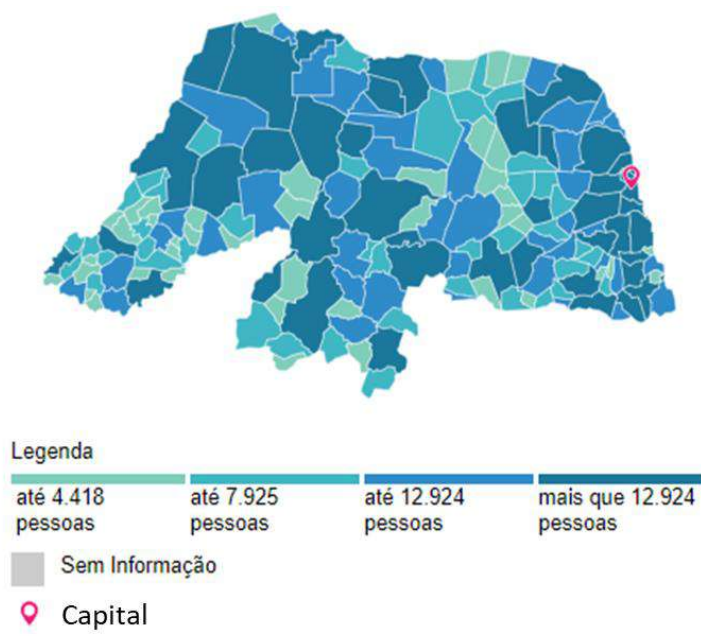
Figura 4.20 - Radiação solar direta normal do Brasil.



Fonte: SOLARGIS (2017).

O estado do Rio Grande do Norte está localizado no nordeste brasileiro, possui divisa com o Ceará, a Paraíba e com o Oceano Atlântico, com território ocupando uma área de 52.811,07 km², cuja população estimada é de 3.479.010 pessoas, com uma densidade demográfica de 59,99 hab/km² (IBGE, 2018). A Figura 4.21 apresenta a quantidade de habitantes por municípios.

Figura 4.21 - Mapa do Rio Grande do Norte com as populações aproximadas de cada município.



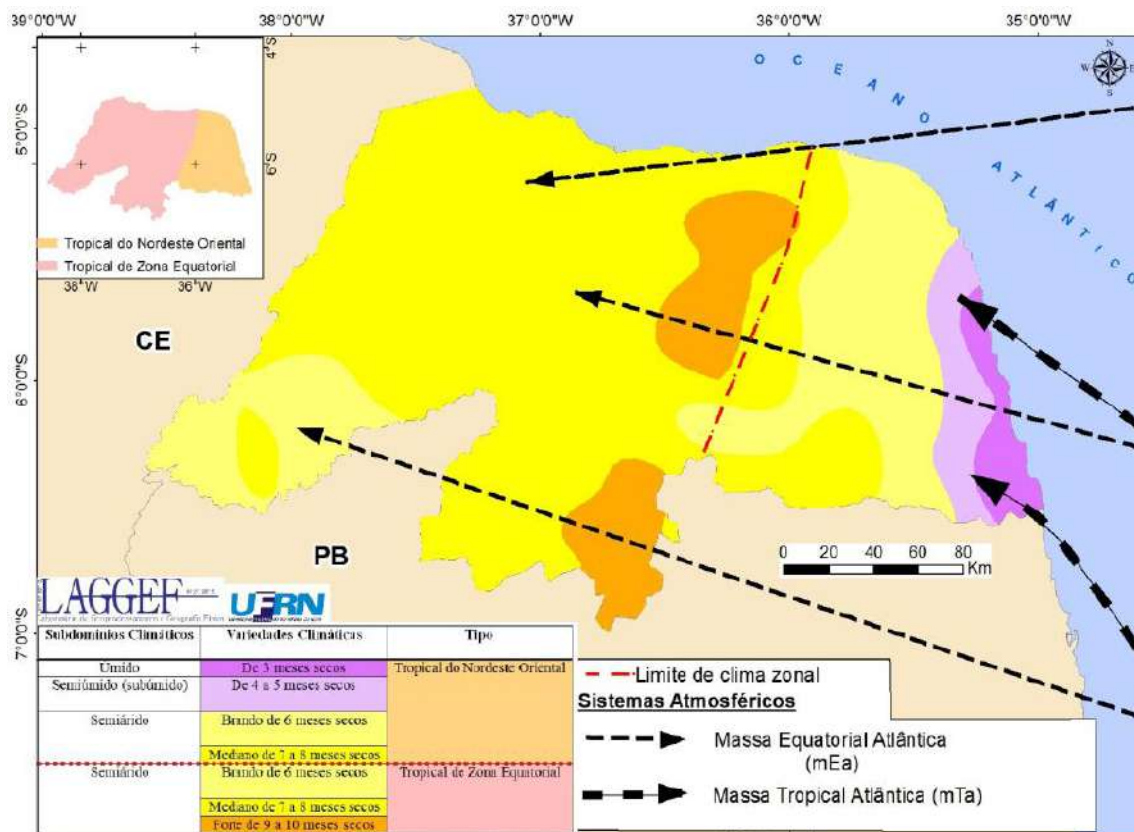
Fonte: IBGE (2018).

O estado é o maior produtor de sal no Brasil, compreendendo 95% da produção nacional, de acordo com o Sindicato da Indústria de Sal do RN, e mais de 500 mil toneladas de sal são exportadas no ano, chegando a países como Canadá, Estados Unidos, Polônia e Nigéria (MAIA, 2017).

A distribuidora responsável pela energia do RN é a Cosern, pertence ao grupo Neoenergia, juntamente com a Coelba (Bahia), Celpe (Pernambuco) e Elektro (São Paulo/ Minas Gerais) (NEOENERGIA, 2018). A Cosern atende os 167 municípios, com 26 agências de atendimento, com 65 subestações, 2.400 km de linha de transmissão e 51.834 km de linha de distribuição (COSERN, 2018).

No que concerne ao clima do estado, pode ser classificado de acordo com a quantidade de meses secos, ou seja, que os milímetros totais de precipitação são iguais ou menores que o dobro da temperatura (DINIZ; PEREIRA, 2015). Dessa forma, conforme os autores, o RN foi dividido em 7 variedades climáticas, 4 subdomínios climáticos e 2 climas, o Tropical do Nordeste Oriental e o Tropical da Zona Equatorial, como é mostrado na Figura 4.22.

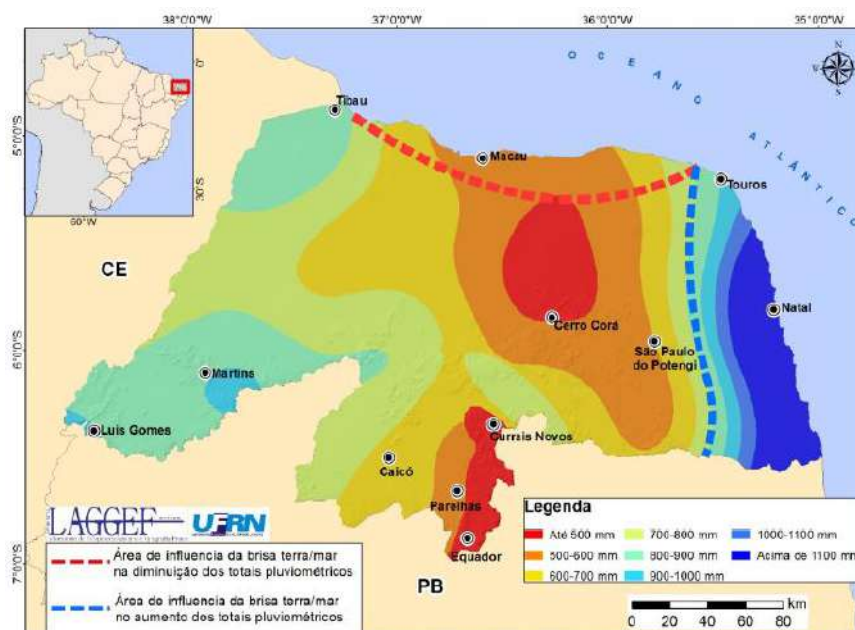
Figura 4.22 - Mapa do Rio Grande do Norte com demarcação de variedades climáticas e tipos de climas.



Fonte: Diniz; Pereira (2015).

A Figura 4.23 mostra as médias pluviométricas do RN, em que certos locais há influência da maritimidade e da altitude. Havendo locais com médias de até 500 milímetros por ano e em outros acima de 1100 milímetros por ano, sendo as áreas mais secas a região central.

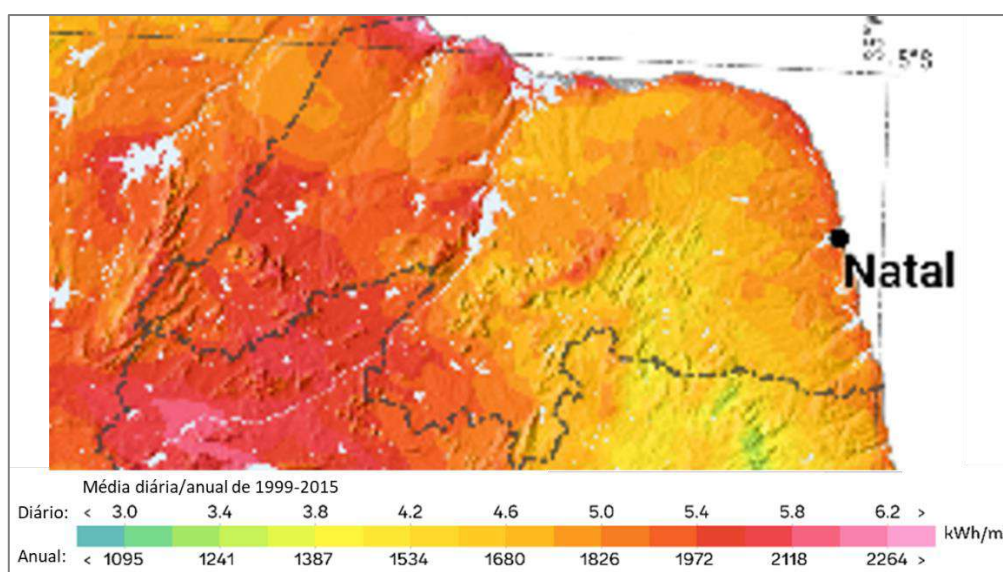
Figura 4.23 - Curvas pluviométricas do Rio Grande do Norte.



Fonte: Diniz; Pereira (2015).

A Figura 4.24 apresenta a quantidade de recurso solar. O RN possui variações dentro de seu território, com regiões com aproximadamente 2045 kWh/m²/ano e em outras com 1680 kWh/m²/ano, sendo a área com mais radiação direta normal as regiões mais a oeste do estado. Outro ponto a ser observado é que maior parte do estado possui um DNI maior que 1826 kWh/m²/ano, ou seja, 5 kWh/m²/dia.

Figura 4.24 - Radiação solar direta normal do Rio Grande do Norte.



Fonte: SOLARGIS (2017).

4.3 Síntese da descrição dos dados analisados

A maior parte das usinas heliotérmicas no mundo possuem a calha parabólica como concentrador, sendo a torre solar é a segunda mais utilizada, depois as lentes de Fresnel e, por último, o prato parabólico. Há uma tendência mundial em investir em usinas com torre solares, pois a maioria das usinas em desenvolvimento ou em construção possuem essa tecnologia.

Também já há usinas em 20 países nos quais estão espalhadas por 6 continentes: América do Norte, América do Sul, Europa, África, Ásia e Oceania, sendo a Espanha, os Estados Unidos e a China os países que mais possuem usinas heliotérmicas, respectivamente.

As usinas do mundo podem ser descritas quanto o país, a tecnologia de concentrador, o status, o recurso solar, a área utilizada, a capacidade bruta da turbina, o ciclo termodinâmico, o tipo de armazenamento, as horas de armazenamento, a quantidade de eletricidade gerada e os empregos na construção e na operação das usinas.

Além disso, foi descrito as características do RN quanto o DNI da região, o nível pluviométrico, a densidade demográfica, a distribuidora presente na região, as dimensões do estado, o clima. E quanto a produção de sal, o estado é o maior produtor do país.

Com isso, o capítulo promoveu um entendimento das usinas no mundo e possibilitou a caracterização do RN. No próximo capítulo serão analisadas as informações adquiridas neste capítulo, promovendo a identificação do tipo de tecnologia de concentrador mais adequado as características do RN.

Capítulo 5 – ANÁLISE E RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado os resultados obtidos com a pesquisa, sendo dividido em três seções: análise dos dados das usinas, análise dos dados do RN e escolha da tecnologia para o RN.

5.1 Análise dos dados das usinas

Os dados fornecidos pelo NREL por meio da análise das características das tecnologias de concentração utilizadas em cada usina, permitiu-se criar um perfil de usinas de acordo com a tecnologia.

Para isso, foi visto qual o perfil das usinas de acordo com o concentrador. A Tabela 5.1 mostra os componentes mais utilizados em fonte preta e outros tipos de componentes que também foram utilizados, mas não foram em maioria, no qual estão postos em letra azul.

Tabela 5.1 - Componentes mais utilizados de acordo com a tecnologia de concentração.

| | Calha Parabólica | Lentes de Fresnel | Torre Solar | Prato Parabólico |
|--------------------------|---|--|---|---------------------|
| Fluido de Transferência | Óleo térmico Sal fundido e água | Água Óleo térmico e sal fundido | Sal fundido e Água | Hélio |
| Sistema de armazenamento | Sem e 2 tanques indiretos 2 tanques diretos e outros | Sem e outros 2 tanques direto e indireto e 1 tanque | 2 tanques direto Sem, 2 tanques indireto e outro | Sem |
| Ciclo termodinâmico | Rankine | Rankine | Rankine | Stirling Rankine |
| Potência | 50 MW Até 600 MW | Até 100 MW | Até 150 MW Até 500 MW | Sem dados |
| DNI | 1900 a 2800 | 1900 a 2100 | 2001 a 2800 | Sem dados |

Fonte: Elaboração própria (2018).

A maioria das usinas com calhas parabólicas possuem o óleo térmico como fluido de transferência, mas também há as que usem sal fundido e água. Para o sistema de armazenamento, há mais usinas sem esse sistema e com 2 tanques indiretos, mas há com 2 tanques diretos e outros tipos. O ciclo utilizado foi o Rankine, em todas as usinas vistas. A potência das usinas foi de 50 MW, havendo usinas com

até 600 MW. E quanto ao DNI, utiliza-se esta tecnologia com 1900 a 2800 kWh/m²/ano.

Para usinas com lentes de Fresnel, o fluido mais utilizado é a água, mas pode ser utilizado o óleo térmico e o sal fundido. Para o sistema de armazenamento é mais comum não se utilizar ou utilizar outro tipo, mas há usinas com 2 tanques direto ou indireto e com 1 tanque termoclina. O ciclo termodinâmico utilizado é o Rankine, e há uma potência de até 100MW. Já o DNI foi visto usinas em locais com 1900 a 2100 kWh/m²/ano.

As usinas com torre solar possuem como fluido de transferência ou água ou sal fundido. O sistema de armazenamento mais comum é por 2 tanques direto, havendo usinas com 2 tanques indireto, sem tanque ou outro tipo. O ciclo termodinâmico é o Rankine e há mais usinas com até 150MW de potência, mas há outras com até 500MW. Já quanto ao DNI, foi visto usinas em locais com 2001 a 2800 kWh/m²/ano.

E quanto a usinas com pratos parabólicos o fluido utilizado é o hélio, não sendo constatado sistemas de armazenamento térmico. O ciclo termodinâmico mais utilizado é o Stirling, mas há usinas com o Rankine. Em relação a potência e ao DNI, não há dados.

5.2 Análise dos dados do RN

Segundo a informação disponível da Solargis (2017), o Rio Grande do Norte possui um nível de DNI acima de 5 kWh/m²/dia em maior parte do Estado, considerado um nível de DNI já adequado para instalação de usinas heliotérmicas. Dessa forma confirma-se a proposição da compatibilidade da região com a forma de geração de energia escolhida.

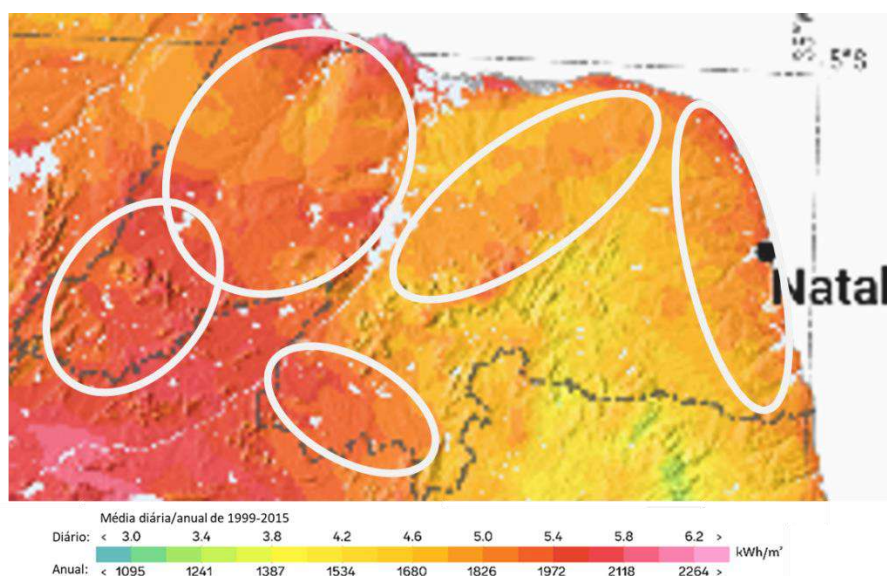
O RN, também, possui um clima semi-árido, em que maior parte do Estado está mais de 7 meses seco, com o total de milímetros igual ou menor que o dobro da temperatura média, viabilizando o estado do céu durante a produção, pois não terá dias chuvosos ou nublados frequentemente, o que é uma característica importante para a geração de energia solar (IEA, 2010).

Porém, não é todo o território norte-riograndense com essas qualidades, em que há áreas com um nível pluviométrico mais elevado, ocorrendo em regiões litorâneas devido às brisas marítimas.

Outro dado importante em relação ao RN é que há empresa distribuidora de energia atuante em todos os municípios, e apresenta mais de 60 subestações espalhadas pelo território.

Para mostrar a região do estado que mais se adequa a usinas heliotérmicas foram selecionadas áreas que possuem mais de 1900 kWh/m²/ano, ou seja, as áreas que são alaranjadas e avermelhadas, excluindo as amareladas, conforme mostrado na Figura 5.1.

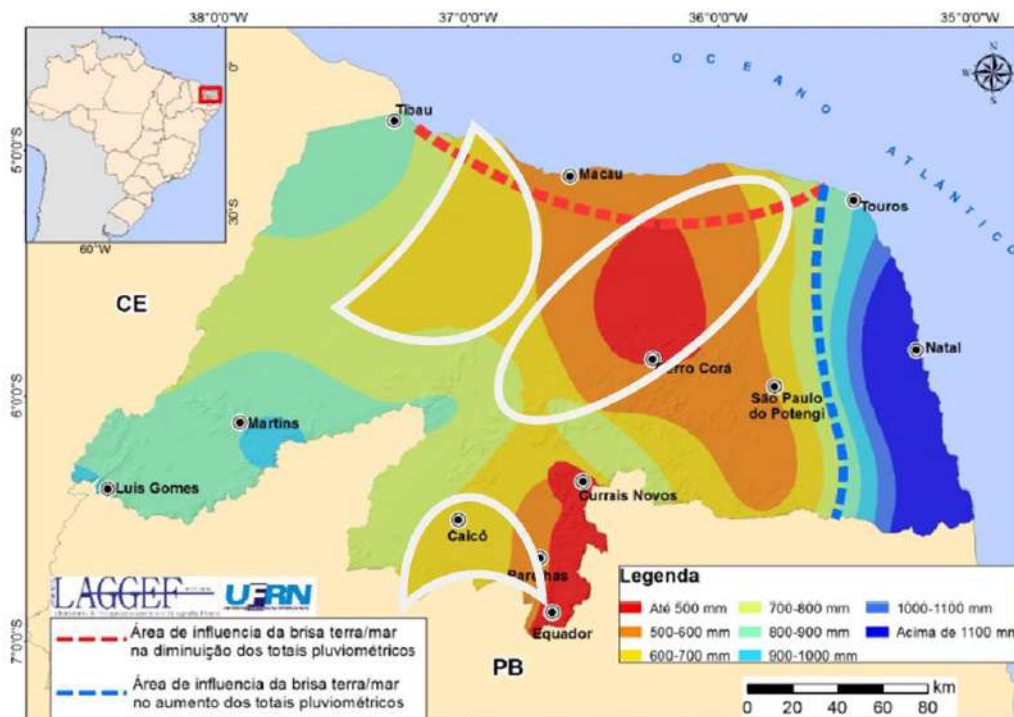
Figura 5.1 - Mapa do Rio Grande do Norte com demarcações de radiação solar acima de 1900 kWh/m²/ano.



Fonte: Adaptado de Diniz; Pereira (2015).

Considerando ainda as áreas com um nível pluviométrico de até 600-700 mm, foram sobrepostas as áreas determinadas de acordo com o DNI e as áreas com índices pluviométricos baixos. Dessa forma, surgiram três áreas com condições adequadas para o funcionamento de usinas, como mostrado na Figura 5.2.

Figura 5.2 - Curvas pluviométricas do Rio Grande do Norte com demarcações de níveis de radiação e pluviométricos adequados.



Fonte: Adaptado de Diniz; Pereira (2015).

E para poder ser localizado melhor a região demarcada, foi sobreposto o mapa com as divisões dos municípios, podendo, assim, observar quais municípios possuem condições favoráveis para o funcionamento de usinas heliotérmicas.

Para confirmar a escolha das regiões, pode se comparar com os dois locais anunciados como possíveis para a instalação de usinas heliotérmicas pelo projeto de parceria do Brasil com a Alemanha, que foram escolhidos as regiões do Vale do Açú e Caiçara dos Ventos (PROJETO ENERGIA HELIOTÉRMICA, [s.d.]), e como consta-se no mapa, na Figura 5.3, ambos estão definidos como áreas próprias para tais usinas.

Figura 5.3 - Mapa do Rio Grande do Norte com demarcações de áreas adequadas de radiação solar e níveis pluviométricos.



Fonte: Adaptado de IDEMA (s.d.).

5.3 Escolha da tecnologia para o RN

Para a proposição da melhor tecnologia a ser utilizada no Rio Grande do Norte foi ressaltado um fator principal, sendo a maturidade das tecnologias. Assim, reduz a análise para as tecnologias do tipo calha parabólica e torre solar, que como demonstrado pelos dados, são as duas mais utilizadas no mundo.

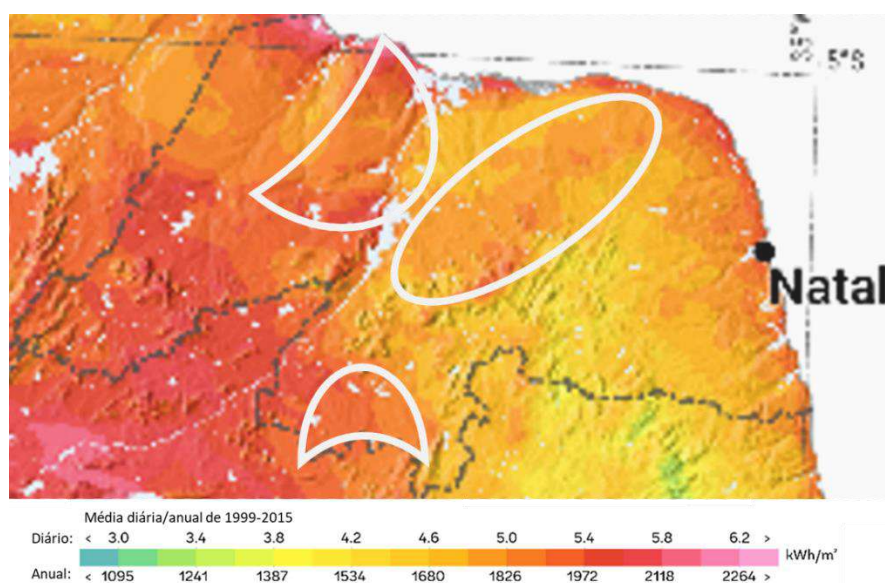
A partir disso, foram necessários a comparação de quatro variáveis para distinguir a tecnologia que deve ter preferência na implantação no RN, nas quais são: tendência da tecnologia no setor; a radiação solar mais adequada; a utilização do sal como fluido de transferência; e a potência instalada.

Foi visto com a análise dos dados das usinas no mundo que há uma tendência para a escolha da tecnologia de torre solar nas futuras usinas, ou seja, a maioria das usinas que estão em desenvolvimento ou em construção possuem torres

solares, sendo uma importante consideração a ser avaliada para tomar a decisão em questão.

De acordo com o DNI, foi comparado as áreas do RN com radiação solar e nível pluviométrico próprio para a implantação de usinas, com os dados mundiais disponíveis sobre o DNI dos locais com usinas, selecionando as áreas circuladas no mapa da Figura 5.4.

Figura 5.4 - Mapa do Rio Grande do Norte com a radiação solar e linhas de demarcação das áreas adequadas.



Fonte: Adaptado de Diniz; Pereira (2015).

As regiões determinadas possuem DNI de 1900 a 1972 kWh/m²/ano, regiões alaranjadas, sendo as áreas com uma maior radiação solar descartadas devido ao nível pluviométrico elevado.

Portanto, considerando a análise dos dados de DNI das usinas, só há concentradores do tipo calha parabólica para DNI de até 2000 kWh/m²/ano. As usinas com torres solares só existem em locais com DNI acima de 2001 kWh/m²/ano.

Outro fator foi a utilização do sal como fluido de transporte, pois o RN é o maior produtor de sal do país, o que poderá facilitar a utilização e diminuir os custos de armazenagem de calor. Dessa forma, de acordo com os dados disponíveis das usinas, são poucas as usinas com calhas parabólicas que utilizam o sal fundido como fluido de transferência. Já entre as usinas de torre solar, a maioria delas utilizam o sal fundido.

Usinas heliotérmicas são investimentos altos que só são viáveis com uma potência e produção elevada. Dessa forma, vê-se que as calhas parabólicas estão com maioria em uma potência de até 50 MW, já que as torres solares concentram o número de usinas em até 150 MW.

Com isso, foram comparadas tais variáveis, chegando a proposição da tecnologia de torre solar ser mais adequada ao Estado do Rio Grande do Norte, devido a ser tendência de investimento no mundo, a possibilidade de utilizar o sal como fluido de transferência e a concentração maior de usinas com maior potência instalada. O Quadro 5.1 apresenta em resumo a comparação das tecnologias de calha parabólica e de torre solar para implantação no RN.

Quadro 5.1 - Fatores para a comparação e escolha da tecnologia de concentração mais adequada para o RN.

| Fator | Calha Parabólica | Torre Solar |
|---|-------------------------|--------------------|
| Tendência de implantação no mundo | | √ |
| Adequação da radiação solar | √ | |
| Utilização de sal fundido como fluido de transporte | | √ |
| Potência Instalada | | √ |

Fonte: Elaboração própria (2018).

Tendo a torre solar como escolha podem ser sugeridas as demais características de acordo com os componentes mais utilizados nas usinas deste tipo, conforme é apresentado no Quadro 5.2. Assim o fluido de transferência seria o sal fundido, com o ciclo termodinâmico Rankine, com potência de até 150 MW e sistema de armazenamento com sistema de 2 tanques diretos.

Quadro 5.2- Componentes da usina heliotérmica com concentrador de torre solar.

| COMPONENTE | TECNOLOGIA |
|--------------------------|----------------------|
| Concentrador | Torre Solar |
| Fluido de Transferência | Sal Fundido |
| Ciclo Termodinâmico | Rankine |
| Potência | Até 150 MW |
| Sistema de Armazenamento | Dois tanques diretos |

Fonte: Elaboração própria (2018).

5.4 Síntese da análise e dos resultados

A comparação das condições climáticas e geográficas necessárias para o funcionamento de uma usina heliotérmica no RN, mostrou que este possui três regiões no estado com condições adequadas para a implantação deste tipo de usina, considerando o nível pluviométrico e o índice de radiação.

Com a análise dos dados das usinas no mundo foi identificado um perfil das usinas de acordo com o concentrador utilizado, por meio da identificação dos componentes mais utilizados em cada tipo. E com todas essas informações, sugere-se a escolha da torre solar como concentrador para ser implantado em uma possível usina no Rio Grande do Norte.

Capítulo 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O aquecimento global e a preocupação com o esgotamento de recursos não-renováveis estão fazendo com que haja um crescimento na geração de energia por fontes renováveis, com energia eólica, solar, das ondas e das marés, entre outras.

Com isso, aumenta-se, também, pesquisas e maior investimento em usinas de energia heliotérmica, um dos tipos de energia solar que concentra a radiação solar para absorver calor e, assim, gerar energia elétrica. Essa forma de geração de energia solar tem a vantagem dentre as demais, pois possui o armazenamento térmico, ao invés de armazenamento elétrico, o que torna mais viável economicamente no fornecimento de eletricidade de forma contínua.

Além disso, possui a geração de energia elétrica similar a fontes convencionais, com a utilização de calor para movimentar uma turbina. E isso, promove uma capacidade e eficiência vantajosa.

O seu principal requisito para o funcionamento é a radiação solar (DNI) suficiente e constante; logo, o Estado do Rio Grande do Norte se mostra como um candidato para a instalação de uma usina heliotérmica e para ser confirmado foi comparado o DNI exigido para usinas heliotérmicas e comparado com o DNI da área do RN.

Contudo, a pesquisa teve como objetivo responder a seguinte questão: qual tecnologia utilizada em usinas heliotérmicas melhor se adequa as condições climáticas e geográficas do Rio Grande do Norte? Para responder tal pergunta foram propostos 6 objetivos específicos: (a) conhecer o estado da arte em tecnologias para energia solar heliotérmica; (b) identificar e descrever as condições climáticas e geográficas necessárias para o funcionamento de usinas heliotérmicas; (c) descrever as características climáticas e geográficas do RN; (d) analisar as tecnologias e as condições climáticas de usinas já em operação no mundo; (e) comparar as condições climáticas e geográficas de usinas em operações com as condições do RN ; e (f) relacionar as opções tecnológicas com as características climáticas e geográficas do Rio Grande do Norte.

O primeiro e o segundo objetivo foram alcançados por meio da análise de 26 artigos relacionados a usinas heliotérmicas. A partir da leitura foi esclarecido o

funcionamento de uma usina, os componentes presentes, os processos que ocorrem e as tecnologias necessárias. Além disso, foi possível identificar o nível de radiação necessária para uma usina se tornar viável. Essas informações estão descritas no Capítulo 2.

O terceiro objetivo foi atingido por meio da coleta de dados sobre o Estado do Rio Grande do Norte, como a radiação solar anual, o nível pluviométrico no estado, os municípios que o compõem e também informações sobre a empresa responsável pela distribuição de energia, todas descritas no capítulo 4.

O quarto objetivo foi cumprida pela análise dos dados obtidas da base de dados da NREL, de todas as usinas no mundo, o que possibilitou o entendimento do uso dos componentes para cada tecnologia de concentrador e delinear quais componentes são mais utilizados para cada tecnologia. A sua descrição está no capítulo 4.

O quinto objetivo foi alcançada pela comparação dos dados colhidos sobre o RN e as informações analisadas nos artigos sobre as condições climáticas e geográficas de usinas. Assim, possibilitou a confirmação da adequação do estado para a instalação de usinas heliotérmicas e a delimitação das áreas mais propícias de acordo com a radiação solar e o nível pluviométrico, descritas no capítulo 5.

Já o sexto objetivo alcançou-se pela análise cruzada de informações e foi possível sugerir a tecnologia de torre solar, por ter ser uma tendência no mundo para futuras usinas, pela maioria das usinas no mundo utilizar o sal fundido como fluido de transporte sendo o RN o maior produtor no Brasil, e por possuir a maioria das usinas com potência instalada de até 150 MW.

Portanto, o objetivo geral do trabalho foi alcançado. A fim de dar continuidade a estudos nesta temática são apresentadas sugestões de trabalhos posteriores, como por exemplo a análise financeiro-econômica da viabilidade de instalação de usinas no estado, como também, o estudo de incentivos por parte do governo para instalação das usinas. Além disso, sugere-se o estudo da cadeia produtiva dos componentes de usinas heliotérmicas, estudando a viabilidade de haver um mercado no RN para suprir as demandas das usinas, podendo ser feita também uma análise dos benefícios que a instalação de uma usina heliotérmica traria para o desenvolvimento do estado.

REFERÊNCIAS

- ADINBERG, R. Simulation analysis of thermal storage for concentrating solar power. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, p. 3588–3594, 2011.
- ALHAYEK, B.; AGELIN-CHAAB, M.; REDDY, B. Analysis of an innovative direct steam generation - based parabolic trough collector plant hybridized with a biomass boiler. n. May, p. 2236–2247, 2017.
- 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.
- 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.
- CORGNALE, C. et al. Screening analysis of metal hydride based thermal energy storage systems for concentrating solar power plants. 2014.
- COSERN. **Principais números da COSERN.** Disponível em: <<http://servicos.cosern.com.br/a-cosern/Paginas/QuemSomos/Principais-numeros.aspx>>. Acesso em: 25 out. 2018.
- CRABTREE, G. W.; LEWIS, N. S. Solar energy conversion. **Physics Today**, v. 60, n. 3, p. 37–42, 2007.
- 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.

DESIDERI, U. et al. Comparative analysis of concentrating solar power and photovoltaic technologies: Technical and environmental evaluations. **Applied Energy**, v. 102, p. 765–784, 2013.

DINIZ, M. T. M.; PEREIRA, V. H. C. Climatologia do estado do Rio Grande do Norte, Brasil: Sistemas atmosféricos atuantes e mapeamento de tipos de clima. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 35, n. 3, p. 488–506, 2015.

FICHTER, T. et al. Assessing the potential role of concentrated solar power (CSP) for the northeast power system of Brazil using a detailed power system model. **Energy**, v. 121, p. 695–715, 2017.

FONTELLES, M. J. et al. METODOLOGIA DA PESQUISA CIENTÍFICA: DIRETRIZES PARA A ELABORAÇÃO DE UM PROTOCOLO DE PESQUISA. 2009.

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.

GEYER, M.; SOLAR, A.; TESKE, S. **CONCENTRATED SOLAR THERMAL POWER - now!** Brussels: 2005.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1991.

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.

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.

IBGE. **Brasil/ Rio Grande do Norte**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/panorama>>. Acesso em: 25 out. 2018.

IDEMA. **Mapa municípios do Rio Grande do Norte**. Disponível em: <<https://mapasblog.blogspot.com/2011/12/mapas-do-rio-grande-do-norte.html>>.

Acesso em: 3 nov. 2018.

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

IEA. **RENEWABLES INFORMATION: OVERVIEW (2018 edition)** INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018.

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.

KALOGIROU, S. A. **Solar thermal collectors and applications**. v. 30, 2004.

KHAN, J.; ARSALAN, M. H. Solar power technologies for sustainable electricity generation - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 414–425, 2016.

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.

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.

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.

MAIA, F. **Sal da terra potiguar**. 2017. Disponível em: <<http://www.tribunadonorte.com.br/noticia/sal-da-terra-potiguar/379250>>. Acesso em: 3 nov. 2018.

MEHOS, M.; KABEL, D.; SMITHERS, P. Planting the seed. **IEEE Power and Energy**

Magazine, v. 7, n. 3, p. 55–62, 2009.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; SAFARI, A. A review on solar energy use in industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 4, p. 1777–1790, 2011.

MÜLLER-STEINHAGEN, H.; TRIEB, F. Concentrating Solar Power: A review of the technology. **Ingenia Q. R. Acad**, v. 18, p. 43–50, 2004.

NEOENERGIA. **Quem Somos**. Disponível em: <[http://www.neoenergia.com/Pages/SOBRE NÓS/quem-somos.aspx](http://www.neoenergia.com/Pages/SOBRE_NÓS/quem-somos.aspx)>. Acesso em: 25 out. 2018.

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

ORTIZ-RIVERA, E. I.; FELICIANO-CRUZ, L. I. Performance evaluation and simulation of a Solar Thermal Power Plant. **2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2009**, p. 337–344, 2009.

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

PROJETO ENERGIA HELIOTÉRMICA. **Existem projetos heliotérmicos no Brasil?** Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/fatos/existem-projetos-heliotermicos-no-brasil>>. Acesso em: 25 out. 2018.

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.

REN 21. **Renewables 2018 - Global Status Report**. Paris: 2018. Disponível em: <<http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>>.

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.

SOLARGIS. **Solar resource maps of Brazil**. 2017. Disponível em: <<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/brazil>>. Acesso em: 25 out. 2018.

SORIA, R. et al. Hybrid concentrated solar power (CSP)-biomass plants in a semiarid region: A strategy for CSP deployment in Brazil. **Energy Policy**, v. 86, n. March 2014, p. 57–72, 2015.

SUN, J.; LIU, Q.; HONG, H. Numerical study of parabolic-trough direct steam generation loop in recirculation mode: Characteristics, performance and general operation strategy. **Energy Conversion and Management**, v. 96, p. 287–302, 2015.

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

VIEIRA DE SOUZA, L. E.; GILMANOVA CAVALCANTE, A. M. Concentrated Solar Power deployment in emerging economies: The cases of China and Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, n. May, p. 1094–1103, 2017.

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.

ZHU, G.; KEARNEY, D.; MEHOS, M. On characterization and measurement of average solar field mirror reflectance in utility-scale concentrating solar power plants. **Solar Energy**, v. 99, p. 185–202, 2014.