

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

ANTÔNIO VENÂNCIO DE MOURA LACERDA FILHO

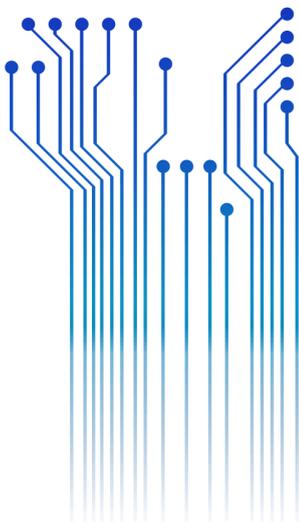


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
EVOLUÇÃO E PERSPECTIVAS DA GERAÇÃO TERMO SOLAR TIPO
RECEPTOR CENTRAL



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2017

ANTÔNIO VENÂNCIO DE MOURA LACERDA FILHO

EVOLUÇÃO E PERSPECTIVAS DA GERAÇÃO TERMO SOLAR TIPO RECEPTOR CENTRAL

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Ubirajara Rocha Meira, M. Sc.

Campina Grande
2017

ANTÔNIO VENÂNCIO DE MOURA LACERDA FILHO

EVOLUÇÃO E PERSPECTIVAS DA GERAÇÃO TERMO SOLAR TIPO RECEPTOR CENTRAL

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação de
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Leimar de Oliveira, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Ubirajara Rocha Meira, M.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais, por terem me dado uma boa educação e por sempre me guiarem no caminho certo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me proporcionado Saúde para chegar até aqui e por ter me dado forças para vencer os obstáculos do curso, que muitas vezes me fizeram pensar em desistir.

Aos meus pais, Carmenilda Tavares e Antônio Venâncio, por sempre estarem trabalhando para proporcionar uma educação de qualidade para todos os seus filhos, buscando sempre nos guiar para o caminho certo e nos apoiando nos momentos difíceis de nossas vidas. Sem eles nada disso seria possível.

Agradeço à minha noiva Dayanne Guedes e também ao meu sogro Marcelo Lancelott e minha sogra Socorro Guedes, por estarem sempre me apoiando a seguir o caminho dos estudos e também me levantando nos momentos que baixei a cabeça e pensei em desistir.

Agradeço ao meu orientador Prof. Ubirajara Rocha, por ter me guiado na elaboração deste projeto e todo o apoio dado para que este se concretizasse.

À Universidade Federal de Campina Grande, por ter proporcionado a estrutura necessária para que eu concluísse o curso.

Agradeço a toda minha família que de forma direta ou indireta estiveram sempre me apoiando para que eu continuasse e buscasse meus objetivos.

Agradeço em especial ao meu amigo que tanto me apoiou na realização deste trabalho, Janderson Jason, e a todos os meus amigos que também me apoiaram de alguma forma: Pedro Henrique, Raoni, Nayara, Djair, Rogério, Rodrigo Torres, dentre vários outros que fariam esta lista ficar imensa.

Agradeço à minha escola da infância, Escola o Reino do Moranguinho, que tanto me ensinou educacionalmente quanto pessoalmente a me tornar a pessoa que sou hoje.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma passaram na minha vida e contribuíram para a construção de tudo isso.

*“O Senhor é meu
pastor e nada
me faltará”*
(Salmos 23,1).

RESUMO

A crescente necessidade de fontes de energia alternativa para os combustíveis fósseis, fez com que o estudo e a procura de novas fontes aumentassem cada vez mais. Esta busca se concentra nas energias renováveis, de forma que seja buscada a diminuição do aquecimento global. Dentre as energias renováveis, a energia solar se encontra disponível em grande parte do mundo, inclusive no Brasil, a região Nordeste com um potencial solar bastante elevado. A busca por novas tecnologias para melhor aproveitamento dessas energias é constante e de suma importância. A energia termo solar, em conjunto com a energia solar fotovoltaica, são formas de geração de energia através da energia solar e vem sendo cada vez mais explorada no mundo todo. O trabalho mostrará um estudo realizado sobre energias renováveis no Brasil e no mundo, com ênfase na energia termo solar utilizando a tecnologia receptor central; mostrará a evolução e também as perspectivas das usinas para os próximos anos, além de mostrar todo o funcionamento da tecnologia e os seus custos para instalação. A partir desse estudo foi possível fazer um levantamento de como se encontra a energia termo solar tipo receptor central no mundo, assim como a evolução do seu custo.

Palavras-chave: Energia solar, Receptor central, Energia renovável, Termo solar.

ABSTRACT

The growing need for alternative energy sources for fossil fuels has made the study and search for new sources more and more. This quest focuses on renewable energies, so that the reduction of global warming is sought. Among the renewable energies, solar energy is available in much of the world, including in Brazil, the Northeast region with a very high solar potential. The search for new technologies to make better use of these energies is constant and of paramount importance, given that the world is in an alarming process of warming. Solar thermal energy, together with photovoltaic solar energy, are forms of energy generation through solar energy and are being increasingly explored worldwide. The work will show a study on renewable energy in Brazil and the world, with emphasis on solar thermal energy using central receiver technology; Will show the evolution and also the prospects of the plants for the next years, as well as showing the full functioning of the technology and its installation costs. From this study it was possible to make a survey of how the central solar energy receptor type in the world is, as well as the evolution of its cost.

Keywords: Solar energy, Central receiver, Renewable energy, solar heat.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de radiação solar no globo em kWh/m ²	20
Figura 2 - Atlas solarimétrico do Brasil em MJ/m ²	22
Figura 3 - Atlas de irradiação solar no Brasil – Média anual em Wh/m ²	23
Figura 4 - Célula fotovoltaica	24
Figura 5 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica.	25
Figura 6 - Previsão do desenvolvimento da energia heliotérmica no mundo.	26
Figura 7 - Espelhos parabólicos.....	27
Figura 8 - Esquema do ciclo da tecnologia calha parabólica.....	27
Figura 9 - Receptores tipo fresnel.....	29
Figura 10 - Ciclo de geração fresnel.....	29
Figura 11 - Sistema de disco parabólico.....	30
Figura 12 – Torre de concentração de receptor aberto.	31
Figura 13 - Receptor externo (Esquerda) e Receptor de cavidade (Direita).	33
Figura 14 - Torre central cercada por heliostatos.	34
Figura 15 - Heliostato e seus componentes.	35
Figura 16 - Heliostato Tipo T.....	36
Figura 17 - Heliostato com primeiro eixo alinhado em direção ao receptor.....	37
Figura 18 - Esquema do sistema de armazenamento utilizando sal fundido.	41
Figura 19 - Armazenamento da planta Gemasolar.	41
Figura 20 – Ciclo de Rankine e seus processos.....	43
Figura 21 - Ciclo diário de uma usina heliotérmica híbrida.	45
Figura 22 - Planta de bombeamento de águas do nilo (Egito, 1913).	49
Figura 23 - Evolução da potência instalada e fator de capacidade.	51
Figura 24 - Usina Gemasolar em Andaluzia.....	54
Figura 25 - Usina de Ivanpah.	56
Figura 26 – Porcentagem dos custos de investimento para componentes.	62
Figura 27 – Curva de aprendizagem.....	63
Figura 28 – Custo de implantação de uma usina heliotérmica com tecnologia receptor central.	64
Figura 29 - Comparação do custo da eletricidade para plantas convencionais e renováveis.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos fluidos de transferência.....	39
Tabela 2 - Perdas presentes.	44
Tabela 3 - Dados da usina PS10.	52
Tabela 4 - Dados da usina PS20.	53
Tabela 5 - Dados da usina Gemasolar.	55
Tabela 6 - Dados da usina de Ivanpah.	57
Tabela 7 - Dados da usina Noor III.	59
Tabela 8 - Principais melhorias para redução do custo de investimento em uma planta de receptor central.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CSP	Concentrated Solar Power (Energia Solar Concentrada)
ProGD	Programa de Geração Distribuída de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment (Avaliação de Recursos Energéticos Solares e Eólicos)
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
GEF	Fundo Global para o Meio Ambiente
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
KW	Quilowatt
KWh	Quilowatt-hora
MW	Megawatt
MWh	Megawatt hora
MW/m ²	Megawatt por metro quadrado
Km ²	Quilômetros quadrados
NREL	National Renewable Energy Laboratory

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	5
1 Introdução.....	14
1.1 Objetivos.....	15
1.2 Organização do Trabalho.....	15
2 Uma Abordagem Teórica.....	17
2.1 Energia solar.....	18
2.2 Potencial Solar.....	19
2.3 Potencial Solarimétrico Brasileiro.....	20
2.4 Energia Fotovoltaica.....	24
2.5 Energia Heliotérmica.....	25
2.5.1 Calha Parabólica.....	26
2.5.2 Lentes de Fresnel.....	28
2.5.3 Disco Parabólico.....	30
2.5.4 Torre Solar.....	31
3 Estudo da Tecnologia.....	32
3.1 Receptores.....	32
3.2 Torre Central.....	34
3.3 Heliostatos.....	35
3.3.1 Orientação do eixo.....	36
3.3.2 Faces dos espelhos.....	37
3.3.3 Fornecimento de Energia.....	37
3.3.4 Tamanho.....	38
3.3.5 Resistência ao vento.....	38
3.3.6 Velocidade de Rotação.....	38
3.4 Fluido de trabalho.....	38
3.5 Armazenamento.....	39
3.6 Ciclo de Potência.....	42
3.6.1 Ciclo de Rankine.....	43
3.7 Desempenho Térmico.....	44
3.8 Hibridização de plantas.....	45
3.9 Perspectivas.....	46
3.9.1 Heliostatos.....	46
3.9.2 Disposição e controle das plantas.....	47
3.9.3 Receptor e média de transferência de calor.....	47
3.9.4 Bloco de alimentação.....	47
3.9.5 Armazenamento.....	48
4 Receptor Central.....	49
4.1 Histórico.....	49

4.2	Plantas em Operação.....	52
4.2.1	PS10/PS20.....	Erro! Indicador não definido.
4.2.2	Gemasolar.....	Erro! Indicador não definido.
4.2.3	Usina de Ivanpah.....	55
4.3	Projetos em Implantação.....	57
4.3.1	Usina de nevada.....	57
4.3.2	Usina heliotermica da China.....	58
4.3.3	Complexo de Noor.....	58
4.3.4	Usina de Israel.....	60
4.3.5	Usina de Dubai.....	60
4.3.6	Usinas no Brasil.....	61
5	Custos de implantação.....	62
5.1	Custos de investimento.....	62
5.2	Curva de experiência.....	63
5.3	Análise da evolução dos custos de implantação.....	63
6	Conclusão.....	67
	Referências.....	68

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de fontes alternativas para as energias fósseis, faz com que as energias renováveis se tornem alvos de muitos estudos importantes, buscando sempre o melhor aproveitamento de fontes renováveis encontradas no mundo, com o objetivo de tornar o processo de geração de energia mais limpo. A geração termo solar utiliza a energia radiante do sol para produzir calor, e a partir disso gerar energia elétrica com altas temperaturas.

Observa-se atualmente que o processo de geração de energia está baseado principalmente na queima de combustíveis fósseis, provocando impactos significativos ao meio ambiente e à saúde humana. Além disso, estas fontes um dia se esgotarão e serão necessárias fontes alternativas.

O fato de que a matéria prima das fontes de energia não renováveis não possui capacidade de regeneração, faz com que seja necessário um investimento maior em pesquisas e tecnologias voltadas à área de energia renovável, que em poucos anos será essencial para o bem de todos.

Para o aproveitamento da energia solar, destaca-se a energia fotovoltaica e a termo solar. A energia fotovoltaica apresenta alguns problemas, como ineficiência na coleta de luz solar e armazenamento de eletricidade, além de baixa capacidade de produção de energia em grande quantidade. As plantas termo solares apresentam potencial elevado e impacto mínimo no meio ambiente.

Nesse contexto, foi realizado um estudo da evolução e perspectivas para a geração termo solar do tipo receptor central, uma das tecnologias utilizadas na geração de energia termo solar.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo acerca das energias renováveis com ênfase na energia solar do tipo termo solar e mostrar as características principais da tecnologia tipo receptor central.

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Expor os conceitos de energia renovável e não renovável, enfatizando as fontes alternativas de energia.
- Mostrar a evolução histórica e as perspectivas das principais gerações termo solares no mundo, inclusive a do tipo receptor central.
- Detalhar o princípio de funcionamento da geração termo solar tipo receptor central.
- Enfatizar, apresentando dados, da viabilidade econômica da geração termo solar tipo receptor central, mostrando a evolução do custo de implantação de uma usina que utiliza tecnologia torre solar, além de mostrar as principais usinas em operação e os projetos em construção ou com previsão de construção.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está dividido em 5 capítulos. O primeiro Capítulo é introdutório e apresenta uma abordagem acerca do tema a ser estudado e também os objetivos de estudo.

O Capítulo 2 aborda as bases teóricas do objeto em estudo, situando a energia solar nas fontes alternativas de energia, abordando também o potencial solar no Brasil e no mundo. Além disso, o Capítulo aborda as formas de aproveitamento da energia solar para geração de energia elétrica, a fotovoltaica e a heliotérmica, demonstrando as tecnologias utilizadas para cada uma delas.

No Capítulo 3, mostra-se um estudo detalhado da tecnologia receptor central utilizada na geração termo solar, abordando cada um dos seus componentes, destacando a importância e forma de utilização de cada um. Além de demonstrar também as perspectivas de possíveis melhores alguns dos componentes desta tecnologia.

No Capítulo 4, é evidenciado o histórico geral da tecnologia CSP, com ênfase na evolução das usinas termo solares que utilizam tecnologia de receptor central, mostrando as primeiras usinas, usinas em operação e também as usinas em construção e usinas com projetos de futura implantação.

No Capítulo 5, é abordado os aspectos econômicos, destacando a porcentagem de investimento de cada componente no custo total de implantação da usina e também mostrando a evolução do custo da energia, tomando como base as usinas em operação e usinas em implantação.

Por fim, no Capítulo 6, é feita uma conclusão apresentando uma análise do que foi abordado nos capítulos anteriores, além de evidenciar as perspectivas para a tecnologia no futuro.

2 UMA ABORDAGEM TEÓRICA

São ditas fontes de energia não renováveis as fontes de energia que estão presentes em quantidade limitada na natureza, ou seja, são esgotáveis. A principal fonte de energia não renovável e grande responsável pelo efeito estufa é o petróleo. Outras fontes de energias não renováveis são o gás natural, carvão mineral e combustíveis nucleares.

As fontes de energia não renováveis apresentam vantagens e desvantagens. Pelo fato de serem fontes exploradas há muito tempo, apresentam, portanto, uma tecnologia de exploração mais avançada e, com isso, se comparadas às energias renováveis, apresentam um preço mais baixo, justificando sua utilização em países pobres ou em desenvolvimento.

A desvantagem das energias fósseis é o fato de que elas um dia irão acabar, além do fato de que a queima de combustíveis fósseis gera poluição, prejudicando a saúde das pessoas, principalmente nas grandes cidades, que a concentração é bem maior. A maioria da geração de energia do Brasil é proveniente de fonte renovável, a energia hidrelétrica, devido aos grandes rios brasileiros que apresentam um potencial energético elevado.

Energia renovável conceitua-se como sendo todo tipo de energia proveniente de fontes naturais capazes de se regenerar, ao contrário dos recursos não renováveis.

As fontes alternativas de energia entram como opção para uma possível substituição destas fontes não renováveis, uma vez que estas aparecem como ameaças ao meio ambiente. Exemplos de energias renováveis: Solar, Eólica, as ondas e a hidráulica. Todas elas apresentam sua origem em comum: o sol. Além destas, é possível ainda citar a biomassa, a energia geotérmica e a das marés, que não dependem diretamente do sol.

O sol é responsável por quase todas as formas de energia utilizadas no mundo (eólica, solar, hidrelétrica, petróleo, etc.), apenas não responsável pela energia nuclear e a energia geotérmica.

2.1 ENERGIA SOLAR

O sol é a maior fonte de energia disponível no nosso planeta. A grande maioria das outras fontes de energia é proveniente da ação deste astro sobre a terra. O petróleo, fonte de energia mais utilizada no mundo, é resultado de milhares de anos de energia do sol acumulada em matéria orgânica.

O sol fornece anualmente $5,445 \times 10^{24}$ joules para atmosfera terrestre. Este valor é considerável ao se levar em conta a energia produzida pelo homem em 1970, que era igual a 2×10^{20} joules. Apesar deste valor de produção de energia pelo homem ter aumentado consideravelmente com o passar dos anos, nota-se que a energia fornecida pelo sol também teve uma elevação considerável.

O raio médio da Terra é de 6.371 km, e sendo o valor da irradiância 1.367 W/m^2 incidindo sobre a área projetada da Terra, conclui-se que a fração da potência total disponibilizada pelo Sol que incide na atmosfera terrestre é de aproximadamente 174.000 TW. Apesar de ser uma pequena fração em relação ao total emitido pelo Sol, estima-se que 84 minutos de radiação solar incidindo na Terra equivale ao consumo de energia mundial durante um ano.

O aproveitamento da energia solar é feito com o uso de coletores ou concentradores solares. Utiliza-se os coletores para aplicações residenciais e também comerciais para o aquecimento de água. Já os concentradores destinam-se a temperaturas mais elevadas, como a produção de vapor. Pode-se gerar energia mecânica com o auxílio de uma turbina a vapor, e posteriormente por meio de um gerador. Essa forma de geração de energia é a heliotérmica, também chamada de termo solar ou *concentrated solar power* (CSP), que é o objetivo deste estudo.

A radiação solar que chega à superfície terrestre e incide sobre a superfície coletora de um sistema CSP é constituída por uma componente direta e por uma componente difusa. A radiação direta é aquela que provém diretamente da direção do Sol. Difusa é aquela proveniente de todas as direções e que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre. Em um dia totalmente sem nuvens, pelo menos 20% da radiação que atinge a superfície é difusa. Já em um dia totalmente nublado, não há radiação direta, e 100% da radiação é difusa.

2.2 POTENCIAL SOLAR

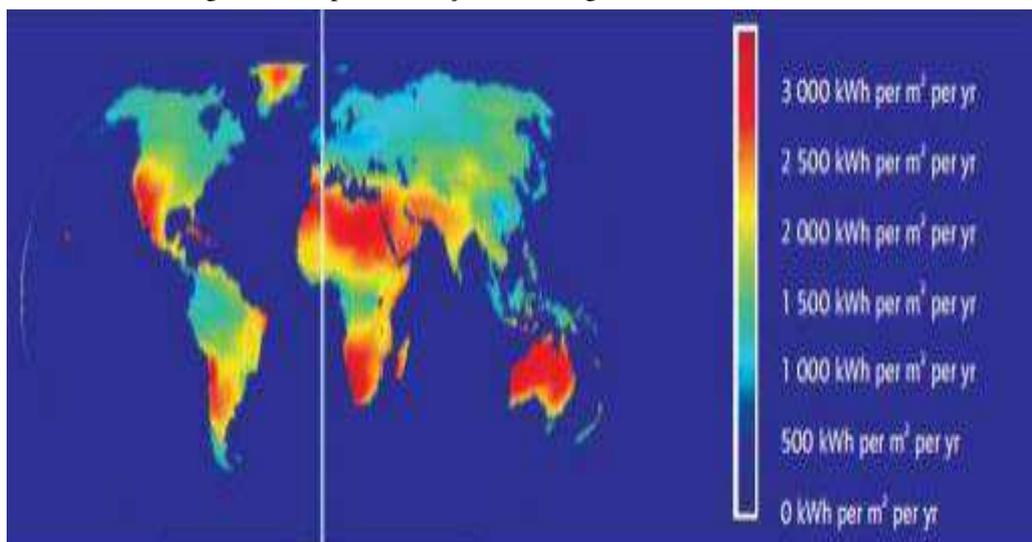
O principal passo para se construir um sistema de geração que utilize a energia do sol é fazer o levantamento do potencial dos recursos solares da região que se pretende instalar o sistema. A disponibilidade do sol é influenciada pelo clima (verão, inverno, primavera e outono) e pela latitude da região (proximidade com a linha do equador).

Todas as informações obtidas sobre as quantidades anuais de insolação de determinada região são colocadas em mapas e bancos de dados para facilitar o acesso em caso de uma possível instalação de um sistema de geração no local. Porém, não se tem uma fonte de informação precisa sobre a radiação solar direta, para que esse grau de precisão seja aumentado, é necessário comparar dados da radiação global com dados da duração média anual da luz solar.

O requisito para que se tenha a instalação de um sistema termo solar em uma região é de que esta apresente uma radiação direta de no mínimo 2.000 kWh/m², porém, para que esse sistema de geração venha a ser competitivo em questão de preço com relação aos outros meios de geração, é preciso que esta região tenha um nível de radiação direta em torno de 2.500 kWh/m² (Philibert, 2005).

Os países que se encontram em regiões áridas e semiáridas, próximos à linha do equador, apresentam os melhores recursos solares para implantação de plantas termo solares. Estes países geralmente apresentam uma população elevada e em sua maioria são países pobres. As instalações dessas plantas solares ajudariam bastante esses países, proporcionando o dinheiro da venda desta energia para países que estejam dispostos a comprar.

Observa-se na Figura 1 que os locais mais promissores para implantação das plantas são o sudoeste Norte americano, alguns países da Ásia Central, algumas áreas da América do Sul e partes da Austrália.

Figura 1 - Mapa de radiação solar no globo em kWh/m²

Fonte: LEAL,S.D.B, 2015, p.26.

2.3 POTENCIAL SOLARIMÉTRICO BRASILEIRO

De acordo com os dados do Plano Decenal de Energia 2024 (PDE 2024), estima-se que a geração de energia elétrica fotovoltaica no Brasil alcançará 7 mil megawatts (MW) até este ano. Atualmente, a fonte é responsável por cerca de 0,02% da potência elétrica do país. Segundo o planejamento, a potência elétrica instalada para a próxima década corresponderá a 4% da potência total brasileira.

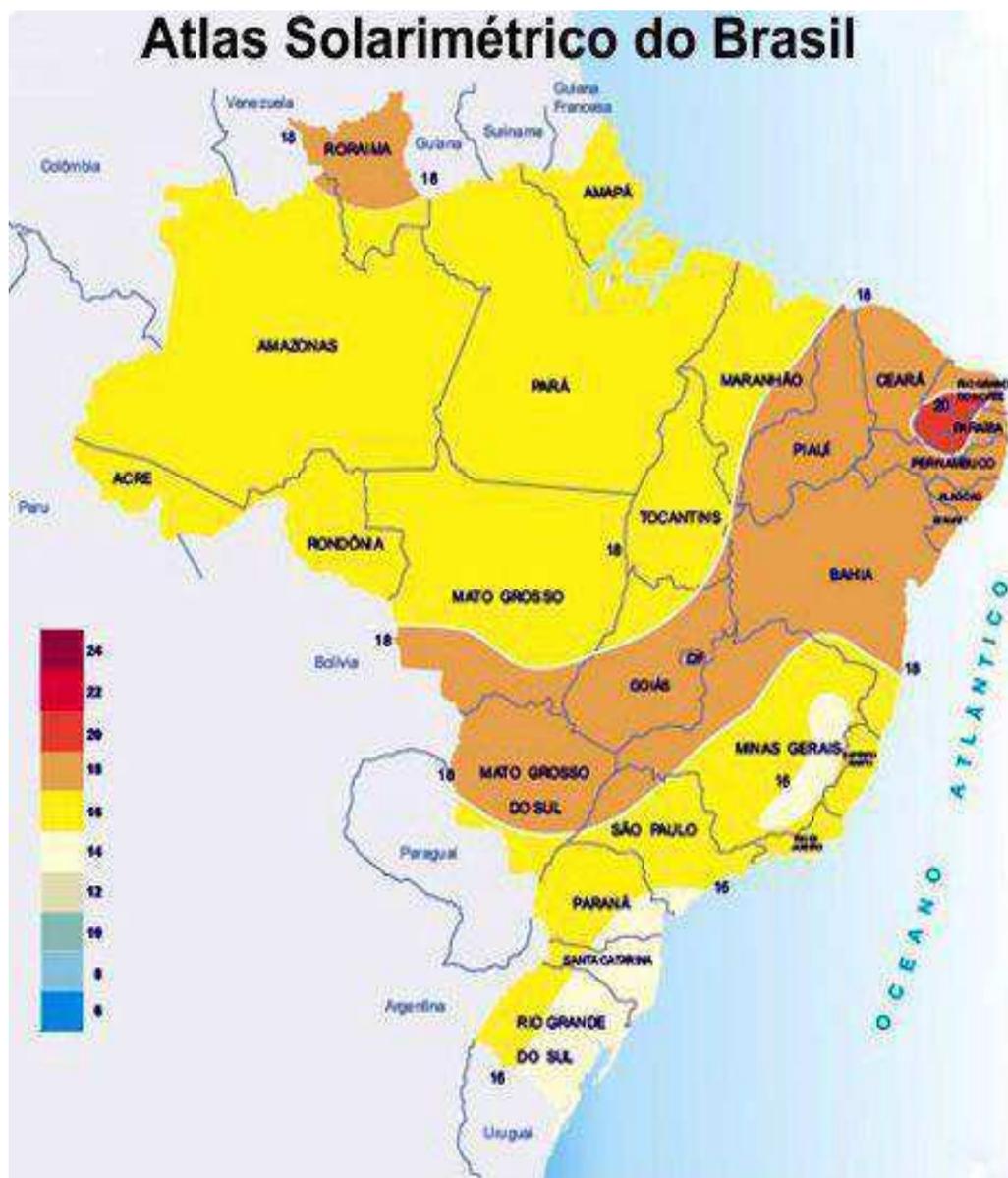
Segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA), a energia solar poderá responder por 11% da oferta mundial de energia elétrica em 2050 (5 mil TWh). Para instalar os painéis necessários para produção desta quantidade de energia é necessária uma área de 8 mil km². Estima-se ainda que 18% dos domicílios no Brasil contarão com geração fotovoltaica.

No ano de 2014, aconteceu a primeira contratação de energia solar de geração pública centralizada, cerca de 890 MW. Em 2015, foram realizados mais dois leilões que totalizaram 2.653 MW contratados, com seu início de suprimento previsto para o ano de 2017 e 2018. Estes foram realizados na modalidade de energia reserva, com o objetivo de fomentar a indústria da energia solar no Brasil. O Ministério de Minas e Energia lançou o programa de Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), para estimular a geração pelos próprios consumidores.

Informações sobre radiação solar no Brasil são coletadas de diferentes formas, e, assim como nos outros países, reúne-se as informações em mapas e bancos de dados. Em 2000, esforços realizados pela UFPE (Universidade Federal de Pernambuco) e a CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco) em parceria com o CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito), resultou no Atlas Solarimétrico do Brasil. Já o trabalho realizado pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e a Universidade Federal de Santa Catarina, resultou no Atlas de Irradiação Solar no Brasil, conforme Figura 3 (ANEEL 2005).

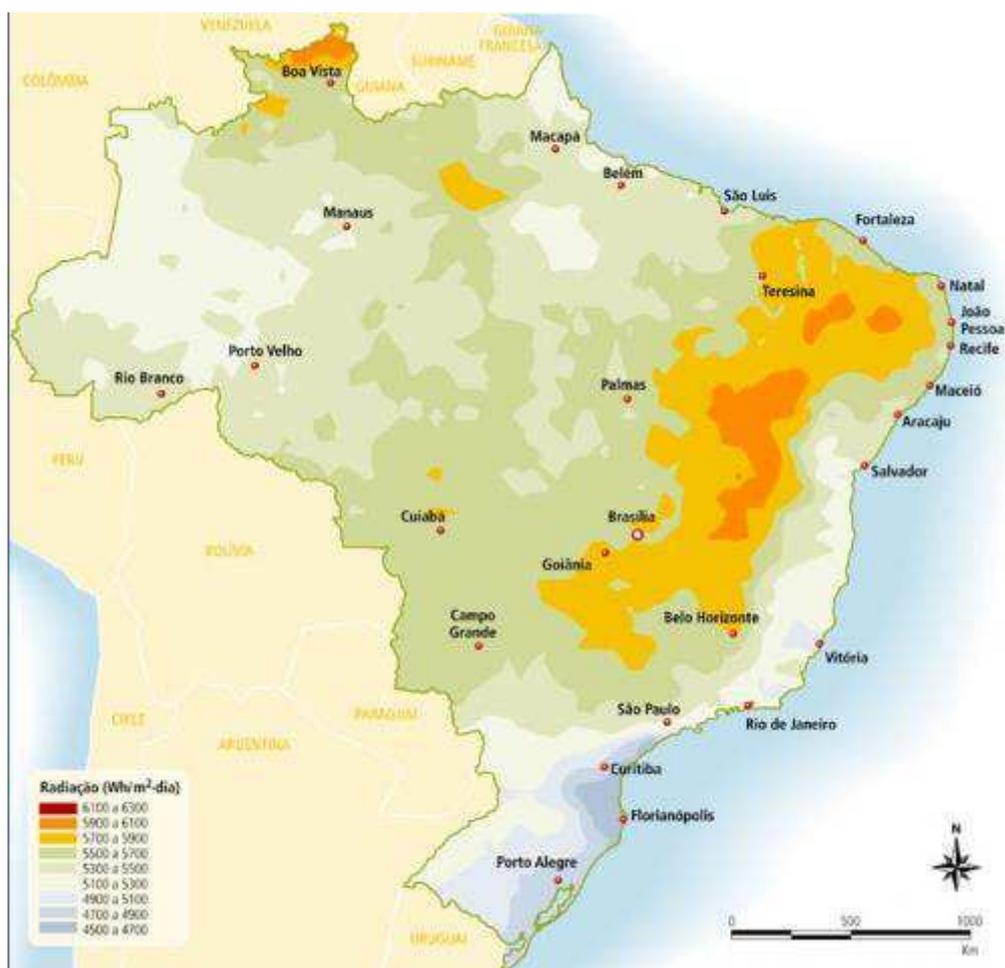
O primeiro Atlas faz uma estimativa da radiação solar incidente (Figura 2), utilizando dados obtidos de estações solarimétricas presentes em todo país, já o segundo (Figura 3) retira imagens extraídas de fotos de satélites. Devem ser utilizados de forma complementar e não de forma concorrente.

O projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) objetivou gerar informações sobre a energia solar, integrado com os dados sócio-econômicos para o planejamento e desenvolvimento energético do país. Esta iniciativa foi apoiada por diversos institutos de pesquisa nacionais e internacionais (LABSOLAR/UFSC, CEPEL, NREL, CBEE, Eletrobrás, NOS), além de instituições climatológicas, espaciais, meio ambiente e de energia (DMA, CPTEC, INPE), e financiada pelo PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente) e pelo GEF (Fundo Global para o Meio Ambiente) (Guarnieri, et al. 2006).

Figura 2 - Atlas solarimétrico do Brasil em MJ/m².

Fonte: MADEIRA, R.A, 2009, p.25.

O Noroeste da Paraíba é um dos melhores lugares do Brasil em relação à incidência dos raios solares. Cidades como Sousa e Patos têm uma radiação média anual de 20 MJ/m². No mês de dezembro, período que tem muito sol, a Paraíba tem uma incidência de 24 MJ/m² ou 26 MJ/m².

Figura 3 - Atlas de irradiação solar no Brasil – Média anual em Wh/m².

Fonte: Inmet/Labsolar/Lepten/UFSC/ND

2.4 ENERGIA FOTOVOLTAICA

A energia fotovoltaica é proveniente da conversão da luz solar em eletricidade, quanto maior seja a radiação solar, maior será a quantidade de energia elétrica produzida, o processo de conversão da energia solar é dado pela utilização das células fotovoltaicas.

As células fotovoltaicas (Figura 4) são capazes de transformar a energia luminosa proveniente do sol ou de outra fonte de luz, em energia elétrica. Para que essa conversão seja possível, estas células são constituídas de materiais semicondutores em que são adicionadas substâncias determinadas como dopantes, para se criar um meio adequado ao estabelecimento do efeito.

Figura 4 - Célula fotovoltaica



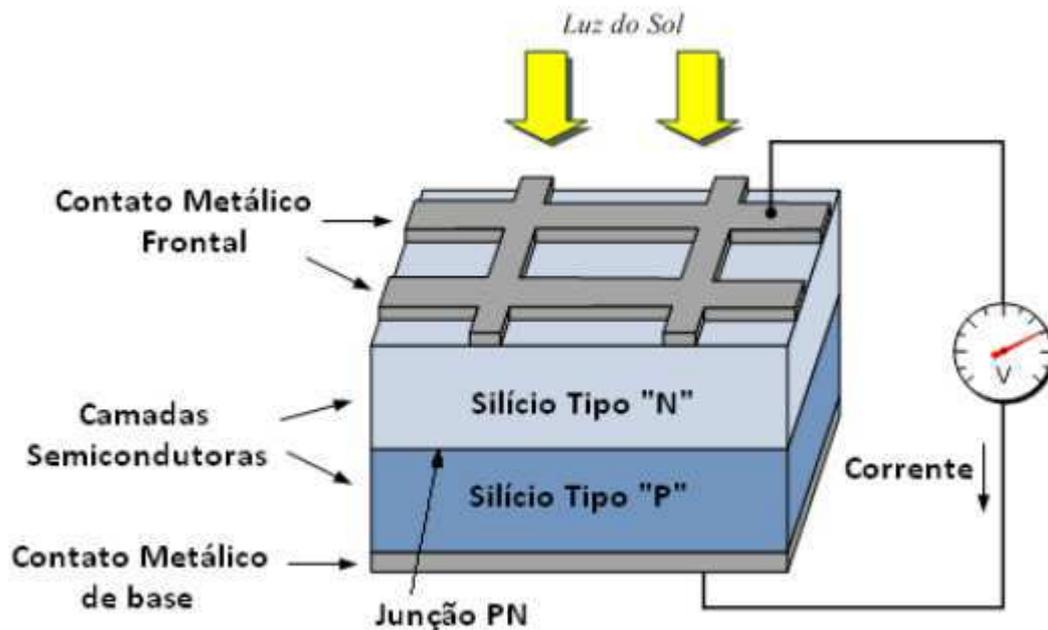
Fonte: BEIGELMAN, B.B, 2013, p.7.

O material semicondutor mais utilizado para condução dos elétrons é o silício, responsável por conduzir a eletricidade de forma mais efetiva que os isolantes e de forma menos efetiva que os condutores. Caracteriza-se pela presença de faixas de energia em que se permite a presença de elétrons, em que se denomina banda de valência, e a outra vazia, denominada de banda de condução.

Na junção PN da célula fotovoltaica, os elétrons livres presentes no lado N irão passar para as lacunas existentes no lado P, o que vai fazer com que ocorra acúmulo de elétrons no lado P e redução de elétrons no lado N. O lado P, por sua vez, estará carregado negativamente, enquanto o lado N estará eletricamente positivo. Na Figura 5, observa-se um corte transversal de uma célula fotovoltaica, destacando o lado P e o lado N, assim como a junção PN.

Conectando-se um fio às extremidades do pedaço de silício, irá ocorrer a circulação de elétrons. Este seria o princípio de funcionamento das células fotovoltaicas.

Figura 5 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica.



Fonte: BEIGELMAN, B.B, 2013, p.5.

2.5 ENERGIA HELIOTÉRMICA

A energia heliotérmica converte a radiação proveniente do sol em energia elétrica por meio da concentração dos raios em um foco, e com isso, transformá-los em calor. O calor gerado é transferido para uma máquina térmica, que em seguida converterá em energia elétrica, diferindo então da energia solar fotovoltaica que converte diretamente a luz solar em energia elétrica.

Enquanto que na usina heliotérmica é utilizada como recurso a radiação direta, e tem gerador com inércia rotacional, a usina fotovoltaica utiliza radiação global e não possui partes móveis. Além disso, as usinas heliotérmicas podem ser utilizadas com um sistema de armazenamento de energia em forma de calor, comportamento parecido com o de uma termelétrica convencional, podendo ainda atender os requisitos de reservas primárias e secundárias do sistema elétrico. Isto difere de forma positiva em relação a outras formas de geração.

Na Figura 6, observa-se uma previsão de crescimento para a energia heliotérmica até o ano de 2050, levando-se em consideração algumas regiões do mundo com capacidade de geração heliotérmica.

Figura 6 - Previsão do desenvolvimento da energia heliotérmica no mundo.



Fonte: Energia Heliotérmica, 2016.

2.5.1 CALHA PARABÓLICA

A tecnologia de calha parabólica é a mais desenvolvida entre as que estão disponíveis. Esta tecnologia utiliza espelhos refletores com uma forma de cilindro parabólico (Figura 7) para concentrar a radiação em um tubo receptor, termicamente eficiente, situado na linha focal da estrutura parabólica. Coloca-se um tubo preto metálico, coberto por um tubo de vidro para evitar as perdas de calor, denominado receptor. As matrizes de espelhos poderão ser de 100 metros ou mais, e a sua abertura de 5 a 6 metros.

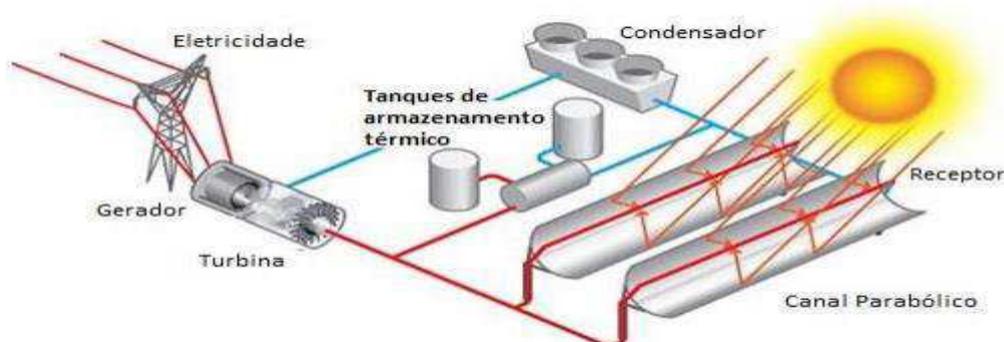
Figura 7 - Espelhos parabólicos.



Fonte – Renewable power News (2009).

Na Figura 8, é demonstrado o esquema do ciclo da tecnologia, o fluido é aquecido dentro dos tubos receptores e direciona-se para um trocador de calor. O fluido troca de calor com a água, que evapora. Em vermelho (Figura 5), pode-se observar que o vapor será direcionado para a turbina, e movimentará o gerador. A eletricidade gerada passa para um transformador, e por fim é inserida na rede elétrica.

Figura 8 - Esquema do ciclo da tecnologia calha parabólica.



Fonte – Solar multimídia.

O mecanismo de rastreamento deve ser confiável dentro de um limite de acuidade para rastrear o sol ao longo do dia, inclusive durante dias nublados intermitentes, e retornar à posição original ao fim do dia ou durante à noite (KALOGIROU, 2009).

O sistema de rastreamento também poderá ser utilizado como mecanismo de proteção, desviando o concentrador do foco em caso de superaquecimento, rajadas de vento e falhas no mecanismo de escoamento do fluido (KALOGIROU, 2009).

Os mecanismos podem ser divididos em:

- Mecânico;

- Sistemas eletroeletrônicos (maior confiabilidade):

- Mecanismos baseados em sensores que detectam a magnitude da iluminação solar para controlar o motor que posiciona o coletor;

- Mecanismos baseados em sensores que medem o fluxo solar no receptor;

- Rastreamento virtual.

No rastreamento virtual, é dispensado a presença dos sensores que são utilizados no rastreamento tradicional, ele opera baseando-se em um algoritmo matemático responsável por calcular a posição do sol em função da data, hora e localização (coordenadas de latitude e longitude) da planta.

2.5.2 LENTES DE FRESNEL

Os refletores do tipo Fresnel constituem-se por um conjunto de espelhos planos dispostos em filas, que irão direcionar os raios solares para o tubo receptor situado acima dos espelhos (Figura 9). Estes tubos receptores são fixados à estrutura e localizam-se dentro de um suporte que possui três faces que não permitem a passagem de radiação solar, com isso, fazendo com que apenas os raios que são refletidos pelos espelhos consigam incidir no receptor.

Os sistemas que utilizam Fresnel apresentam como vantagem o menor espaço necessário para instalação da sua planta se comparado com os sistemas de canal parabólico, devido as linhas não fazerem sombras umas nas outras. Além disso, o fato dos espelhos situarem-se quase que de forma paralela ao solo, faz com que a estrutura tenha uma maior estabilidade, tendo uma menor interferência dos ventos.

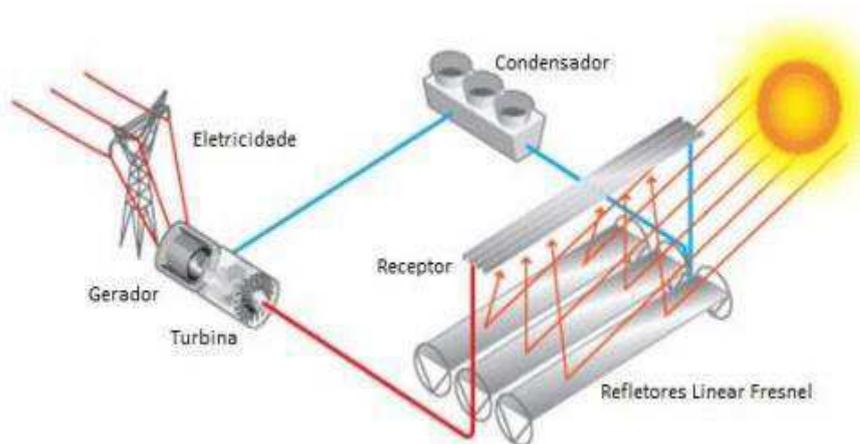
Figura 9 - Receptores tipo fresnel.



Fonte – Climate Action Programme.

O seu ciclo de geração é demonstrado na Figura 10, seu funcionamento também é semelhante ao da torre solar e do cilindro parabólico, o seu fluido de trabalho é a água, recebendo o calor dos refletores e vaporizando. Este vapor, em vermelho (Figura 10), irá em direção a turbina, fazendo que a mesma entre em movimento, que por sua vez irá gerar a energia elétrica através do gerador. Para que o ciclo seja reiniciado, o vapor que sai da turbina é condensado e redirecionado para os espelhos.

Figura 10 - Ciclo de geração fresnel.



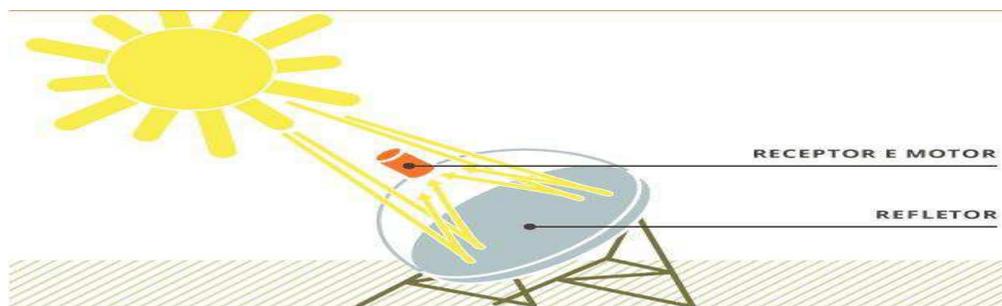
Fonte – MARANHÃO, I.M, 2014, p.18.

2.5.3 DISCO PARABÓLICO

A tecnologia de disco parabólico consiste em refletores no formato de disco parabólico que irão concentrar a luz solar em um receptor que fica localizado em um ponto focal do espelho parabólico, conforme Figura 11. A estrutura dos coletores e o receptor irão se mover juntos, à medida que o conjunto se move durante o rastreo solar. A irradiação absorvida é utilizada para aquecer um fluido até aproximadamente 750 °C. O fluido aquecido será então utilizado para gerar eletricidade em um motor Stirling, que se encontra acoplado ao receptor.

O motor Stirling opera com aquecimento e resfriamento de um gás ininterruptamente, fazendo movimentar um pistão, ele irá converter o calor para uma força mecânica, comprimindo o fluido, e posteriormente, expande-se o fluido através de uma turbina ou com o pistão para produzir o trabalho. O gerador que se encontra acoplado a este motor, irá converter a energia mecânica em energia elétrica.

Figura 11 - Sistema de disco parabólico.



Fonte – Energia Heliotérmica.

Esta tecnologia é pouco utilizada devido à dificuldade de armazenar a energia, fazendo com que a mesma tenha sua capacidade de geração reduzida. O fato do ciclo de Stirling não necessitar de água para resfriamento, sendo resfriados pelo ar, faz com que o consumo de água seja reduzido consideravelmente. Esta característica faz com que estas plantas sejam ideais para instalação em locais desérticos. Sua modularidade faz com que seja possível sua utilização para aplicações remotas individuais.

2.5.4 TORRE SOLAR

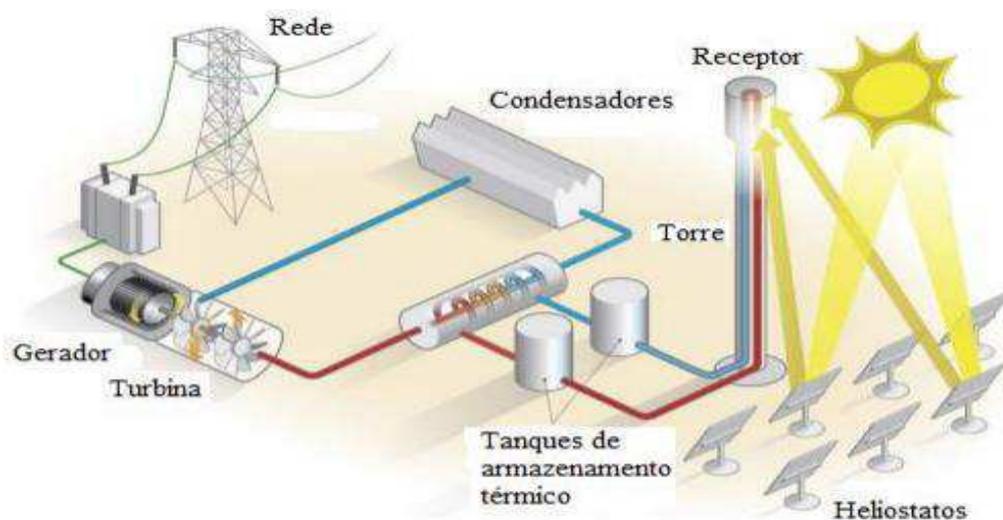
As usinas solares de receptor central se caracterizam pela presença de uma enorme torre no centro. O conjunto de heliostatos que se localizam ao redor desta torre são responsáveis por concentrar a luz solar no receptor que fica localizado no topo da torre. Este receptor irá absorver a radiação e converterá em calor que, por meio do fluido de transferência, será conduzido para o gerador de vapor da usina, localizado na base da torre.

Algumas vantagens do receptor central (KALOGIROU, 2009):

- Os espelhos coletam a luz solar e a concentram em um único receptor, minimizando assim o transporte de energia térmica.
- Por concentrar os raios solares em um único receptor central e por rastrear o sol em dois eixos, possui altas taxas de concentração, de 300 a 1500, menor apenas que o disco parabólico.

Na Figura 12 é mostrado um esquema de uma usina solar de receptor central, os heliostatos ficam alinhados de modo que a radiação solar que a sua superfície seja redirecionada para o receptor localizado no topo da torre, estes espelhos devem se mover de acordo com o sol, de modo que se tenha um maior aproveitamento dos raios solares e conseqüentemente uma alta eficiência na coleta.

Figura 12 – Torre de concentração de receptor aberto.



Fonte: LEAL, S.D.B, 2015, p.39.

3 ESTUDO DA TECNOLOGIA

Para a construção de um campo de geração de energia termo solar, é necessário que se tenha todas as informações sobre o funcionamento de todas as partes do sistema, para que assim seja feita uma correta instalação de cada componente. Neste capítulo serão mostrados os principais componentes do campo e sua participação no funcionamento da usina.

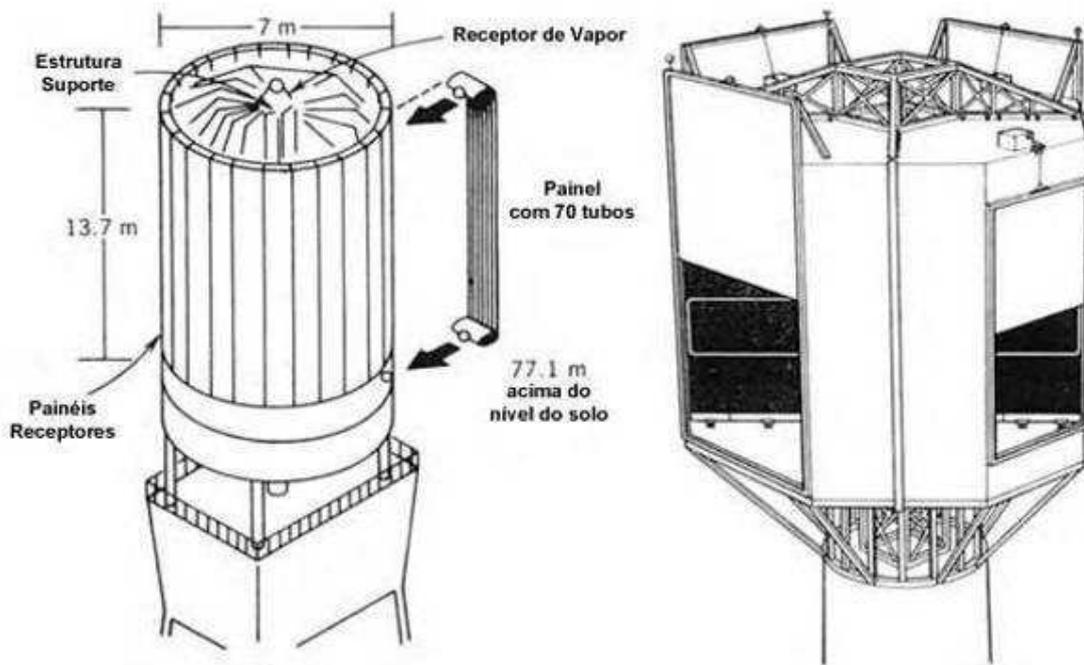
3.1 RECEPTORES

Os receptores localizam-se no topo da torre e captarão a radiação solar concentrada refletida pelos heliostatos, e realizarão a conversão térmica, transferindo para o fluido de transferência. Pode-se classificar os receptores em dois grupos:

- Receptores Externos: Instala-se os elementos absorventes no lado exterior da estrutura (por exemplo, cilindro). Consiste de painéis posicionados formando um cilindro vertical no topo da torre. Determina-se sua área pelo tipo de fluido de transferência e também pela temperatura de operação do sistema.
- Receptores de Cavidade: Instala-se os elementos absorventes dentro de uma cavidade, neste caso, o receptor terá proteção sobre as condições ambientais e redução da radiação.

Os receptores externos irão ter uma redução da eficiência, pois estarão expostos às condições climáticas e ambientais, enquanto que os internos estão protegidos. Já o receptor de cavidade, perderá na capacidade de disposição dos heliostatos, tendo em vista que a angulação dos mesmos estará reduzida, enquanto que para os receptores externos, poderão estar dispostos circulando a torre em 360°.

Figura 13 - Receptor externo (Esquerda) e Receptor de cavidade (Direita).



Fonte – Stine e Geyer, 2001.

Além desta classificação, os receptores ainda podem ser classificados de acordo com a forma que a radiação é absorvida e transferida. Tem-se duas categorias:

- Receptores de Absorção Indireta: A radiação aquecerá a superfície absorvente, e então o calor é transferido por condução e convecção para um meio de transferência de calor.
- Receptores de Absorção Direta: A radiação será absorvida diretamente no meio de transferência de calor.

São necessários alguns requisitos que os receptores devem seguir para que possam ser instalados:

- Converter e transferir o calor com alta eficiência.
- Aceitar fluxos de calor elevados e não homogêneos.
- Longa vida útil a um custo aceitável.

Devido ao grande esforço que o receptor sofre durante a geração de energia, trabalhando em altas concentrações de fluxo de calor e em altas temperaturas, deve-se atentar para os limites térmicos e mecânicos. Alguns transientes podem ocorrer, como,

por exemplo, nuvens bloqueando totalmente ou parcialmente a luz, o que leva a tensões elevadas nos materiais que afetam a vida útil do receptor.

Sua eficiência é influenciada pela temperatura e pela densidade média do fluido no receptor. Como os fluidos líquidos apresentam uma capacidade de transferência de calor maior, eles permitem um receptor menor que os gasosos.

3.2 TORRE CENTRAL

A estrutura da torre é constituída de aço ou concreto. Ela deve ser instalada com uma certa altura, de forma que as sombras e possíveis bloqueios da luz solar sejam minimizados. Sua função básica é servir de suporte para o receptor.

Sua altura terá influência sobre os custos da geração de calor e de eficiência do campo heliostático. Para alturas menores que 120 metros, o uso do aço na sua construção apresenta um menor custo com relação ao uso do concreto. No seu planejamento, deverão ser realizadas as seguintes considerações:

- A sombra da torre terá efeito negativo sobre a eficiência do campo de heliostato.
- A estabilidade contra o vento.
- Espaço suficiente para montagem e manutenção do receptor e de outros componentes que se localizam na torre.
- Possível instalação de um receptor mais avançado posteriormente.

Figura 14 - Torre central cercada por heliostatos.



Fonte – Agenciasinc, 2012.

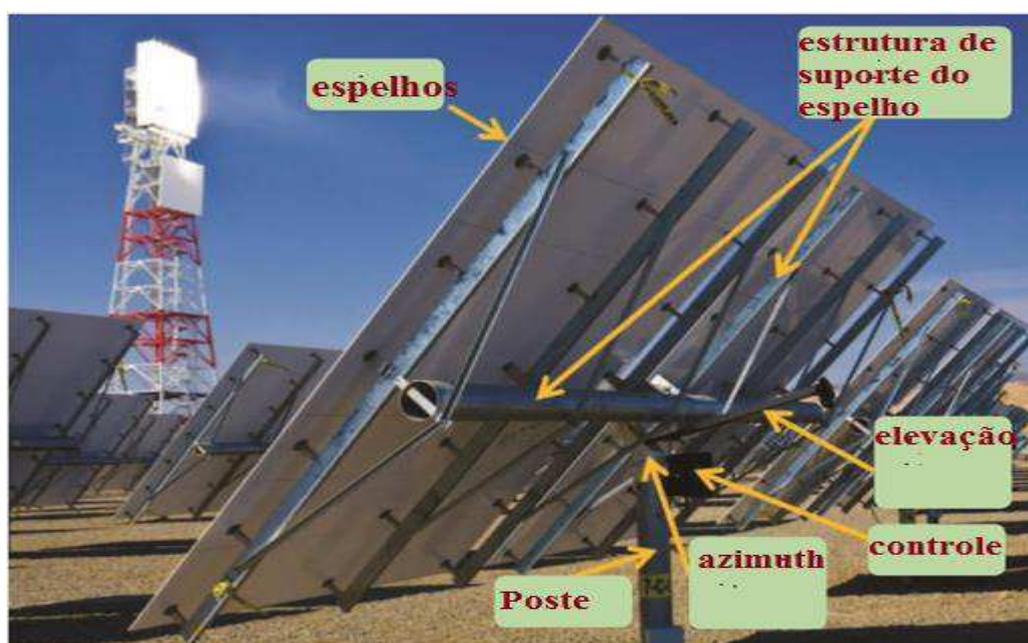
3.3 HELIOSTATOS

O heliostato refletirá os raios solares em direção ao receptor que fica no topo da torre central. Seu nome é originado dos termos “hélio”, para o sol, e “stat”, para o fato de que a imagem solar é refletida para uma posição fixa ao longo do dia. Possuem alguma curvatura para concentrar a energia do sol no receptor localizado na torre central.

Para que a imagem do sol seja mantida no receptor, os heliostatos devem rastrear o tempo todo, de maneira que a imagem refletida se posicione no receptor. Os principais componentes do heliostato são mostrados na Figura 15 e serão descritos a seguir. São eles: espelhos, estrutura de suporte, poste e fundação, sistema de controle de rastreamento e inversores.

Os espelhos são apoiados com uma estrutura de suporte, similarmente ao que acontece com o tipo cilindro parabólico, a estrutura é conectada a um poste fixado ao solo adequadamente, sendo também importante na orientação dos espelhos em direção ao sol e no suporte a cargas externas, como o vento. Nota-se ainda uma caixa em que se encontra a parte de controle do sistema, assim como uma espécie de braço, que funciona como unidade de elevação dos espelhos. A função das estruturas de controle é basicamente realizar o movimento dos espelhos em direção ao sol para garantir uma maior eficiência ao longo do dia (Buck et.al, 2014).

Figura 15 - Heliostato e seus componentes.



Fonte – Adaptado de Brightsource Energy, 2014.

3.3.1 ORIENTAÇÃO DO EIXO

Existem alguns tipos de opções de orientação dos eixos de rotação, descritos abaixo:

- Azimute-Elevação: Neste caso os espelhos irão girar em torno do primeiro eixo vertical para seguir o movimento azimutal do sol. Montados em um tubo de toque que gira ao redor do segundo eixo horizontal para seguir a elevação do sol durante o dia. O pilar e o tubo de torção horizontal formam um “T”. Por isso, muitas vezes este tipo é chamado de “heliostato tipo T”.

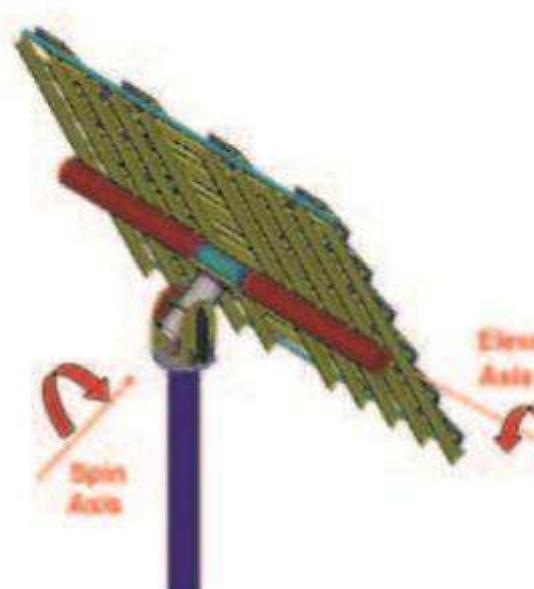
Figura 16 - Heliostato Tipo T.



Fonte – Projeto Energia Heliotermica, 2014.

- Alvo alinhado: Quando o eixo de rotação primário está alinhado em direção ao receptor, isso faz com que o erro óptico se reduza. Em pequenas usinas com grandes heliostatos, o seu ganho de eficiência é considerável.

Figura 17 - Heliostato com primeiro eixo alinhado em direção ao receptor.



Fonte – Projeto Energia Heliotermica , 2014

3.3.2 FACES DOS ESPELHOS

Para evitar a degradação, e também devido à sua estabilidade, os espelhos de vidros com costas prateadas são a preferência. Vidro fino (~1 mm) proporciona uma melhor refletividade, porém, necessita um apoio adicional. Já para os vidros espessos (~4 mm) são autoportantes e podem ser fixados com poucos pontos de fixação. A redução do custo de material deve ser maior que a perda de refletividade vezes o custo benefício do heliostato completo.

3.3.3 FORNECIMENTO DE ENERGIA

O fornecimento de energia e comunicação do campo de heliostatos atualmente é dado por fios. Este custo ainda pode ser evitado, fazendo uso de heliostatos autônomos com células fotovoltaicas, armazenamento de energia e comunicação sem fio. Além da vantagem da redução de custo com fios, que chega a ser bastante alta em campos com heliostatos pequenos, a utilização de heliostatos autônomos também economiza na proteção contra raios, uma vez que, em caso de raios atingindo um heliostato isolado, este afetaria apenas ele e não o campo completo.

3.3.4 TAMANHO

Com aumento dos comprimentos das bordas do painel do espelho, a área de espelho aumenta com a mesma relação para potência de dois. Com isso, todas as outras dimensões do heliostato também deverão ser aumentadas para que se mantenha o esforço de flexão constante. Pequenas estruturas de suporte dos espelhos são vantajosas devido a terem o peso específico mais baixo, tendo em vista que o peso é uma medida de custo para produções mais elevadas.

3.3.5 RESISTÊNCIA AO VENTO

Outro fator que também afeta os heliostatos, além da energia solar, é o vento. A sua estrutura, seu modo de instalação e acionamentos devem levar em consideração as cargas máximas de vento possíveis de acontecer na região do campo de heliostatos. Para tempestades, o plano de espelho orienta-se horizontalmente para assim atingir a área mais baixa de ataque do vento. Estas cargas são determinadas em ensaios em túneis de vento. Pesquisas sobre as cargas do vento contribuem para redução dos impactos e criação de novas tecnologias, como por exemplo os amortecedores.

3.3.6 VELOCIDADE DE ROTAÇÃO

O heliostato deve ainda ser capaz de retirar o foco do receptor, de modo que seja evitado o superaquecimento. Deve ser capaz de suportar ventos, e também mover-se para a posição de segurança. Nesta posição de segurança do heliostato, ele se encontra com a superfície especular paralela ao solo, e os espelhos voltados para baixo ou para cima. Um Heliostato regular deve ser capaz de resistir a tempestades de granizo, com pedras de 19 mm de diâmetro e até 20 m/s de velocidade (Stine e Geyer 2001).

3.4 FLUIDO DE TRABALHO

O receptor que está localizado no alto da torre central possui em seu interior um fluido que converte os raios solares que estão concentrados em energia térmica. Este meio de transferência de calor tem influência nos componentes e configuração do sistema. Como é possível observar na Tabela 1, o vapor de água, ar e sais fundidos são alguns dos exemplos destes fluidos de transferência de calor.

O meio de transferência de calor poderá ser gasoso, líquido ou sólido. No caso dos fluidos gasosos, possuem uma grande faixa de operação. Podem ser usados a partir da temperatura ambiente e quase sem limite para temperatura máxima. O que limita esta temperatura é apenas o material receptor. A desvantagem dos fluidos gasosos é o baixo coeficiente de transferência de calor, devido à baixa condutividade térmica. Os sais fundidos também poderão ser utilizados para armazenamento de calor, possuem boa capacidade de transferência.

Tabela 1 - Características dos fluidos de transferência.

Fluido	Transferência de Calor	Faixa de Temperatura	Custos	Perigo ao meio ambiente	Notas
Ar	Ruim	Boa	Bom	Não	-
Vapor	Boa	Média	Bom	Não	Utilizados nas plantas PS10/PS20/Ivanpah/Khi Solar One
Sais Fundidos	Boa	Média	Médio	Não	Pode ser utilizado como meio de armazenamento de calor. Utilizado na planta Gemasolar

Fonte – SOUSA, Y.R de, 2015, p 36.

3.5 ARMAZENAMENTO

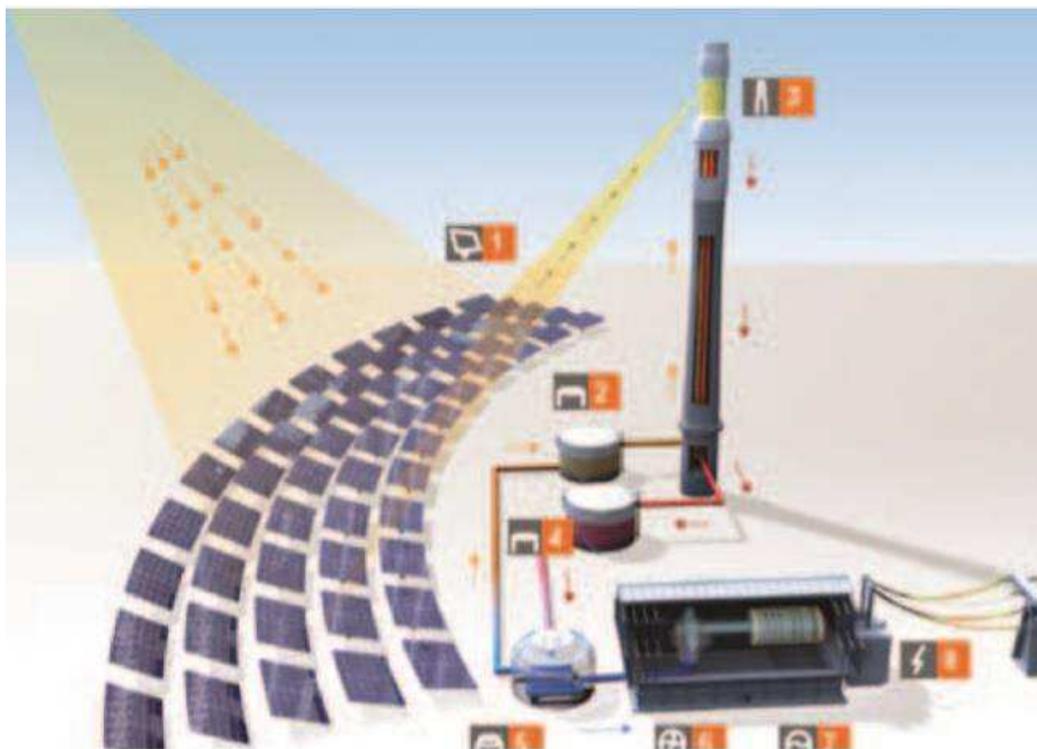
Emprega-se o sistema de armazenamento como forma de aproveitar o excesso de energia que é coletada, e armazená-lo em um ambiente adequado para que seja possível sua utilização durante os períodos de ausência do sol. O sistema de armazenamento também irá garantir mais estabilidade no fornecimento de energia elétrica para o sistema em que se encontra conectado, tendo em vista que a energia solar é coletada em função das condições climáticas e ambientais (horário, índice de nebulosidade, etc.), o que faz com que esta energia entregue a rede varie.

Alguns motivos levam a realizar a otimização do sistema, alguns deles são:

- Aumento do rendimento total anual de conversão de energia solar em elétrica;
- Diminuição do custo da energia elétrica produzida;
- Aumento da taxa interna de retorno (TIR) do investimento, que será recuperado mais rapidamente.

Na Figura 18 é mostrado um sistema de armazenamento que utiliza sal, nos sistemas que utilizam o sal fundido como fluido para transferência de calor, aplica-se um sistema de armazenamento de calor sensível. Neste caso, utiliza-se dois tanques, um tanque “frio” (sal fundido com temperatura de 290 °C, item 2, da Figura 18) e um tanque “quente” (sal fundido com temperatura de 565 °C, item 4 da Figura 18). A partir do momento que o armazenamento é carregado, o sal do tanque frio será alimentado pelo receptor e então será aquecido. O sal quente será então encaminhado para o tanque quente, mudando, assim, o nível de sal nos tanques. Durante esta passagem, o sal que estava no tanque quente encaminha-se por meio do gerador de vapor para conduzir o bloco de alimentação. O sal arrefecido é alimentado de volta para o tanque frio, mudando assim os níveis dos tanques, desta vez no sentido inverso.

Figura 18 - Esquema do sistema de armazenamento utilizando sal fundido.



Fonte – Projeto Energia Heliotérmica, 2014

Neste sistema de dois tanques, o volume correspondente tem que ser instalado igualmente no tanque frio e no tanque quente. Os tanques de armazenamento da usina Gemasolar (Figura 19) localizam-se na parte inferior da torre. Cada tanque tem diâmetro de 23m e uma altura de 10,5m. A massa total de sal no armazenamento é de 8500 toneladas.

Figura 19 - Armazenamento da planta Gemasolar.



Fonte – Projeto Energia Heliotérmica, 2014.

3.6 CICLO DE POTÊNCIA

Para que ocorra a conversão da energia térmica proveniente da incidência da radiação solar refletida pelos heliostatos, em outra forma de energia, como a energia mecânica e energia elétrica, necessita-se utilizar um sistema que converta a energia térmica em alguma dessas energias. Esta conversão ocorrerá através de um ciclo de potência, que a partir de uma série de expansões, compressões e trocas de calor, transmitirá a energia térmica da radiação solar concentrada a um fluido de trabalho que irá gerar vapor a alta pressão, com isso fazendo operar uma turbina acoplada a um gerador elétrico, produzindo eletricidade.

No ciclo de turbina a vapor, o vapor pressurizado irá mover a turbina, convertendo energia térmica em mecânica. Para se maximizar a produção, gerando energia em momentos em que não haja sol, pode-se utilizar o ciclo combinado. Este ciclo combinado consiste em aproveitar os gases e vapor gerado pelo ciclo de turbina a gás em uma turbina a vapor, e assim realizar a produção de energia mecânica extra. Estas plantas são denominadas de plantas híbridas.

Todo processo do ciclo de potência está sujeito a perdas e limitações que podem ser reduzidas a níveis aceitáveis, fazendo com que o rendimento de um ciclo não alcance 100%. Esta limitação diz respeito a Segunda Lei da Termodinâmica que diz que nenhum ciclo de potência pode converter mais calor em trabalho que o ciclo de Carnot. Até meados do século XIX, acreditava-se que seria possível a construção de uma máquina térmica ideal, capaz de transformar toda a energia fornecida em trabalho, ou seja, com rendimento total de 100%. O modelo proposto por Nicolas Carnot, demonstrou que isso não seria possível, estabelecendo um ciclo de rendimento máximo, que passou a ser chamado de Ciclo de Carnot. Sua equação de eficiência térmica é dada por:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{Fria}}{T_{Quente}} \quad (1)$$

Em que,

T_{Quente} e T_{Fria} são as temperaturas absolutas das fontes de aquecimento e de resfriamento, respectivamente, são expressas em Kelvin.

Para que o rendimento chegasse a 100%, a temperatura absoluta de resfriamento da fonte teria que ser de 0K, concluindo-se que o zero absoluto em um sistema físico não é possível.

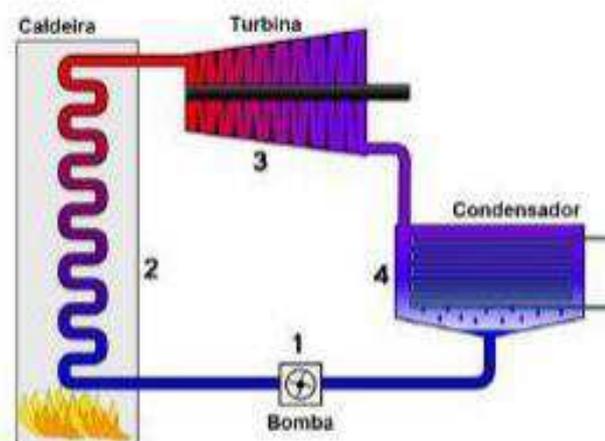
3.6.1 CICLO DE RANKINE

O ciclo mais utilizado nos sistemas de geração termo solar é o ciclo de Rankine, que combina aquecimento a pressão constante e processo de rejeição com compressão e expansão adiabática reversível. Baseia-se em quatro processos, são eles:

- Bombeamento adiabático;
- Transformação da água em vapor a pressão constante na caldeira;
- Expansão adiabática na turbina;
- Condensação do vapor a pressão constante no condensador.

O ciclo demonstrado na Figura 20, é composto, de forma macro, por um gerador de vapor, um expensor (turbina) e um condensador. O processo se inicia a partir do momento que o fluido de transferência entra no receptor (caldeira) recebendo a energia térmica da radiação solar, provocando seu sobreaquecimento e evaporação. Posteriormente, o vapor produzido irá seguir em direção à turbina, onde se expande fornecendo energia mecânica, usada para mover o gerador elétrico que produzirá eletricidade. Ao alcançar o condensador, a temperatura do vapor é reduzida, extraindo seu calor residual e transformando em líquido novamente, seguindo até a caldeira novamente em que terá sua pressão elevada por uma bomba, reiniciando o ciclo.

Figura 20 – Ciclo de Rankine e seus processos.



Fonte – SOUSA, Y.R de., 2015, p.51.

As limitações no rendimento do sistema poderão ser por exemplo, a resistência térmica dos materiais que são construídos os componentes do ciclo, o que faz com que a

temperatura do fluido na entrada da turbina seja limitada, e os mecanismos de refrigeração que podem limitar a temperatura de resfriamento do vapor.

3.7 DESEMPENHO TÉRMICO

Além das características apresentadas anteriormente, o sistema de receptor central também apresenta uma característica importante e que está presente em todos os sistemas de geração de energia: perdas associadas às atividades de coleta, na transmissão e na conversão da energia.

É possível realizar a divisão dos tipos de perdas que existem neste tipo de sistema, classificando-as em perdas do campo e perdas do receptor (ver Tabela 2):

Tabela 2 - Perdas presentes.

Classificação	Tipo	Descrição	Observações
Perdas de Campo	Refletância	Absorção de parte da energia coletada pelo heliostato	Apesar de existir espelhos com refletância de 94%, o tempo e a sujeira reduzem esse valor. Manter os heliostatos limpos e em boas condições.
	Atenuação Atmosférica	Atenuação da energia devido a processos de absorção e dispersão em seu caminho entre o heliostato e o receptor.	Função das condições atmosféricas. Apresenta maiores valores para heliostatos mais afastados.
	Sombreamento	Redução da área de coleta da energia causada por sombras sobre a superfície especular.	Acontecem principalmente nas primeiras horas da manhã e no final da tarde. Para campos bem projetados, estas perdas tendem a ser desprezíveis ao meio dia
	Bloqueio	Interrupção do fluxo da luz solar por um heliostato a frente, impedindo a energia de alcançar o receptor.	
Perdas do Receptor	Radiação	Radiação Térmica emitida do receptor ao ambiente.	Função do tamanho do receptor e da temperatura de operação do sistema. Pode ser dividida em perda por reflexão e por emissão.
	Convecção	Ocorrem, basicamente durante a movimentação da massa de fluido aquecido no receptor.	Podem ser naturais ou forçadas.
	Spillage	Acontecem quando a energia direcionada ao receptor pelo heliostato não alcança a superfície absorvedora, por causa das imperfeições e erros na superfície dos heliostatos.	Pode ser reduzido aumentando o tamanho do receptor.

Fonte – Adaptado de Sargent and Lundy Consulting Group, 2003.

3.8 HIBRIDIZAÇÃO DE PLANTAS

Uma forma única utilizada como alternativa das plantas de concentração solar é a possibilidade de realizar a construção de plantas híbridas. Estas plantas são vistas como uma forma de garantir que a planta continue funcionando mesmo quando o sol não brilha. Seu funcionamento consiste na utilização de duas fontes de energia em paralelo, a solar e a fóssil, inserindo-se um queimador para realizar a inserção de calor necessário para o funcionamento do bloco de alimentação, quando necessário.

Pelo fato da planta de concentração solar já apresentar estrutura suficiente para o ciclo completo da energia térmica, necessita-se apenas da inserção das caldeiras, equipamentos auxiliares e trocadores de calor apropriados. Este tipo de usina tem algumas vantagens, como, por exemplo, a redução de transitórios na energia que é entregue, já que está associada a radiação solar que sofre muitas variações durante o dia. Além disso, esta hibridização pode reduzir os custos de construção da usina, tendo em vista que os gastos com um sistema de armazenamento poderiam ser descartados.

Estas caldeiras poderão operar com gás natural, diesel, podendo ainda se utilizar de biomassa, biogás ou hidrogênio, como alternativa à utilização dos combustíveis fósseis. Na Figura 21 é possível observar a utilização da energia direta do campo solar no horário em que a radiação solar está presente, após o término dessa energia direta do campo solar, observa-se a utilização da energia do armazenamento, armazenada durante o dia, e posteriormente, fazendo uso do combustível de apoio em determinado horário do dia.

Figura 21 - Ciclo diário de uma usina heliotérmica híbrida.



Fonte – IEA (2010a)

3.9 PERSPECTIVAS

Pelo fato da tecnologia de receptor central está em fase inicial, muitas melhorias tecnológicas são propostas e testadas pelos fabricantes e instituições de pesquisa. Focando para os seguintes tópicos:

- Redução de custos
- Novas tecnologias, que resulta em menor custo de investimento específico
- Melhoria de desempenho
- Aumento da eficiência
- Estratégias de controle avançado.

3.9.1 HELIOSTATOS

O campo de heliostatos representa grande parte dos custos de investimento, apresenta um alto potencial de redução de custos futuros. Algumas empresas constroem heliostatos maiores (exemplo, Abengoa), outras empresas produzem heliostatos muito pequenos. Os maiores oferecem menor custo para acionamento (atuadores hidráulicos), porém a estrutura heliostática fica mais cara devido as cargas de vento. Já os menores apesar de receberem baixa carga de vento, a quantidade é bastante elevada. Não se tem uma resposta de qual tipo representa um menor custo, a implementação de comunicação sem fio também é um objetivo para reduzir o custo de campo.

O modo de fabricação tem um papel importante na redução de custo sobre os heliostatos, portanto, além dos avanços tecnológicos, deve-se levar em consideração como estes estão sendo produzidos. Para que ocorra uma melhoria nesta fabricação, deve-se implementar tecnologias para produção em massa e componentes de baixo custo (complexidade reduzida, número de peças reduzidos, ...). Incluem-se também novos tipos de acionadores, além de novos tipos de faces para os espelhos. O CSP representa para os governos uma boa oportunidade para geração de empregos.

3.9.2 DISPOSIÇÃO E CONTROLE DAS PLANTAS

É necessário um melhoramento no layout das plantas, de forma que o posicionamento dos heliostatos tenham uma flexibilidade maior. Porém, o melhoramento neste ponto é limitado, os métodos de controle avançado que serão implementados nos softwares de controle, permitem a operação otimizada da planta com os requisitos necessários.

3.9.3 RECEPTOR E MÉDIA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Os esforços para desenvolvimento neste ponto, estão voltados para maiores densidades de fluxo solar, o que resultará em receptores menores, mais baratos e com mais eficiência. Também é desejável uma melhoria nos revestimentos dos espelhos, de modo que a absorção dos raios solares ocorra de forma mais eficiente.

Em conjunto com uma melhor transferência de calor, também procura-se ter temperaturas de recepção maiores, os meios propostos são:

- Sal fundido com maior estabilidade à temperatura, para temperaturas até 700°C, potencialmente também usado como meio de armazenamento.
- Metais líquidos, para temperaturas até 1000°C, sistema de armazenamento indireto usando outro meio deve ser desenvolvido.
- Partículas sólidas: também utilizadas como material de armazenamento, para temperaturas até 1000°C.

3.9.4 BLOCO DE ALIMENTAÇÃO

Os novos projetos de receptores e meios de transferência de calor podem fazer com que o limite de eficiência seja aumentado. Posteriormente a estas inovações, podem ser usados novos ciclos de vapor com maiores eficiências. Porém, os trocadores de calor também se tornarão mais caros, e ainda não se sabe ao certo se esta implementação vale a pena.

No geral, observa-se que os ciclos alternativos de energia, podem proporcionar redução significativa de custos e melhoramento do sistema. Porém, ainda requerem um alto investimento para pesquisa e mão de obra para obter as vantagens desejadas.

3.9.5 ARMAZENAMENTO

Para os casos de sistemas de sal fundido, investiga-se conceitos com ou sem material de enchimento. Uma consideração para garantir a separação entre o sal quente e o sal frio é a utilização de paredes móveis. Isso faz com que não seja necessário a utilização de um segundo tanque. Porém, na utilização de um segundo tanque pode-se ter uma exposição a condições de funcionamento mais desafiantes.

4 RECEPTOR CENTRAL

4.1 HISTÓRICO

O primeiro registro de tecnologia CSP aconteceu entre 1864 e 1870, o engenheiro John Ericsson construiu um coletor para abastecer um motor de 373 W através do vapor gerado no coletor. Outras experiências foram realizadas por Ericsson e em 1907 aconteceu o primeiro registro de patente de um coletor parabólico por Wilhelm Maier e Adolf Remshardt na Alemanha.

Em 1901, foi desenvolvido um sistema de bombeamento de água em uma fazenda, localizada na Califórnia, por A.G.Eneas. Esta estrutura era composta por 1788 espelhos na parte interior de uma parábola, fazendo com que os raios solares fossem direcionados para uma caldeira, gerando o vapor necessário para acionar a bomba.

Já em 1912, construiu-se também uma planta de bombeamento próximo ao Rio Nilo (Figura 22), no Egito, um sistema ocupando cerca de 1200 m², operando uma bomba com vazão máxima de 22,7 m³ de água por minuto.

Figura 22 - Planta de bombeamento de águas do nilo (Egito, 1913).



Fonte – RAGUEB (2011) apud LODI (2011).

Os avanços na área do petróleo e combustíveis fósseis foram notáveis logo após a Primeira Guerra Mundial, fazendo com que o investimento na energia solar fosse colocado em segundo plano. Nos anos 70, estes investimentos retornaram na Europa e nos Estados Unidos, com a Energy Research and Development Administration (ERDA), International Energy Agency (IEA) e U.S. Department of Energy (DOE).

Segundo (BUTTI e PERLIN, 1980), o primeiro sistema de torre solar foi testado no ano de 1965 em Sant’Ilario, próximo a Genoa na Itália, pelo genovês Giovanni Francia (1911-1980).

Nos anos 80, iniciou-se a utilização da tecnologia de concentração solar para geração de energia elétrica, duas plantas foram construídas, marcando a volta das pesquisas, a planta SEGS I e II (Solar Energy Generating Systems), na Califórnia, Estados Unidos, com tecnologia cilindro parabólico e potência de 14 MW e 30 MW, respectivamente. Pouco depois, fechou-se ainda vários contratos, levando a construção das SEGS III a IX, totalizando uma potência de 354 MW.

Durante 15 anos, mais precisamente entre 1991 e 2006, os investimentos e pesquisas na área de energia solar, ênfase na parte de concentração, praticamente não existiu, o que fez com que as SEGS fossem vendidas para grupo de investidores e passassem a operar de forma independente.

Em 2007, a torre solar comercial da Abengoa, PS10, próximo a Sevilla, começou a operar. A partir daí algumas fábricas foram colocadas em operação:

- PS20, 20MW, além do PS10.
- Gemasolar, 19,9MW, perto de Sevilla, Espanha.
- Sierra SunTower, 5MW, perto de Lancaster / CA (EUA)
- Ivanpah: 377MW, Ivanpah Dry Lake / CA (EUA)

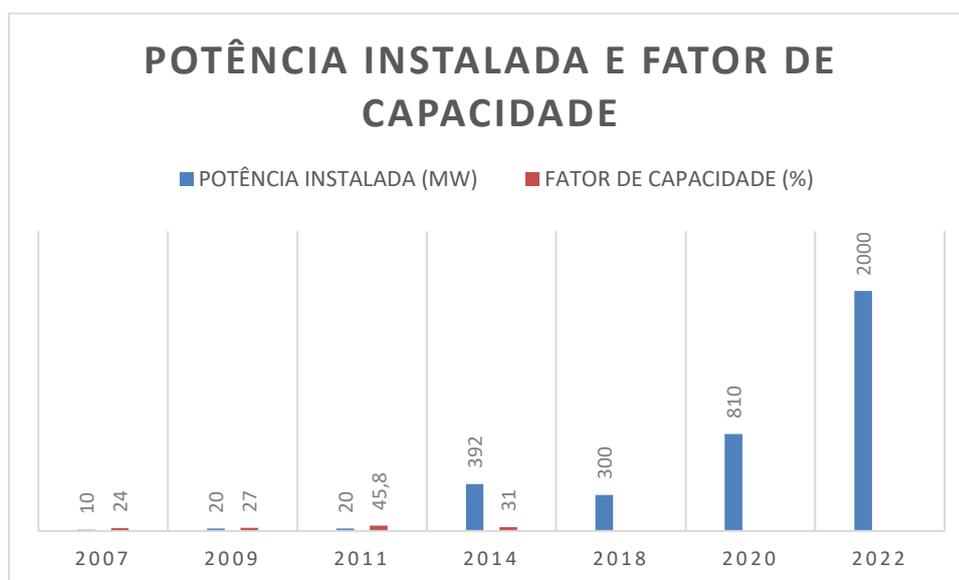
Algumas organizações não governamentais pressionavam as nações por acordos internacionais que, frequentemente, culminavam em ações que aceleravam o crescimento de tecnologias de geração de energia não poluentes (baixíssimas ou zero emissão de CO₂). As principais regiões que contribuíram para o avanço destes “mercados verdes de energia” foram Europa e América do Norte, criando fundos para geração de eletricidade por fontes renováveis e/ou pagamentos diferenciados da energia produzida. O grande

problema era que as plantas termo solares raramente eram incluídas na lista de tecnologias qualificadas (Aringhoff, et al. 2005).

Ainda, em 2002, a Espanha foi o primeiro país que obrigou empresas a comprarem energia de fontes renováveis, a um preço estipulado pelo governo. O kWh era comprado a 0,12 euros. Já em 2004, este pagamento foi aumentado por um decreto do governo e passou a custar 0,18 euros, além de garantido por 25 anos com reajustes anuais. Estas atitudes tomadas pelo país fizeram com que a confiança dos investidores aumentasse.

Uma análise da evolução da capacidade das Usinas Heliotérmicas ao longo do tempo é feita observando os dados de usinas já construídas, assim como dados de usinas que estão em fase de implantação, com isso, é possível montar um gráfico que demonstre todo esse crescimento.

Figura 23 - Evolução da potência instalada e fator de capacidade.



Fonte – NREL, adaptado pelo Autor (2017).

Percebe-se a partir do gráfico, que com o desenvolvimento da tecnologia ao longo dos anos, a potência instalada nas usinas construídas cresceu consideravelmente, demonstrando um crescimento progressivo para o futuro.

O fator de capacidade é a proporção entre a produção efetiva da usina em um período de tempo e a produção total máxima. O cálculo do fator de capacidade das usinas em operação foi realizado a partir dos dados obtidos no National Renewable Energy Laboratory (NREL), através da fórmula:

$$CF = \frac{\int_0^T P(t) dt}{P_{nominal} T} \quad (2)$$

Em que: T é o período analisado

P (t) é igual a potência gerada no instante t e,

P_{nominal} é igual a potência nominal do sistema.

4.2 PLANTAS EM OPERAÇÃO

Nesta seção serão mostradas algumas plantas em operação atualmente, serão mostrados seu potencial e suas características gerais.

4.2.1 USINA DE TORRE SOLAR NA ESPANHA

A usina de energia solar PS10 (em Espanhol: Planta Solar 10), é a primeira torre de concentração de energia solar comercial construída na Europa, ela opera próximo a Sevilla. Esta torre produz cerca de 11MW de eletricidade.

A torre PS10 produz eletricidade para atender as demandas de aproximadamente 5.500 domicílios, o que equivale a população de Sanlúcar la Mayor. Evita a liberação de 6.000 toneladas de CO₂ para a atmosfera. Na Tabela 3 é mostrado os dados básicos mais importantes da usina PS10.

Tabela 3 - Dados da usina PS10.

Componente	Informação
Tecnologia	Torre Solar
Status	Operação
País	Espanha
Área	0,55 km ²
Recurso Solar	2,012 kWh/m ² /ano
Geração de Energia	23,400 MWh/ano
Fator de Capacidade	24%
Custo	27 centavos de euro por kWh
Armazenamento	Outro (30 min)
Início de Operação	2007
Fluido de Transferência	Água
Receptor	Cavidade

Fonte – NREL.

A segunda torre de energia solar, a PS20, assim como a torre PS10, produz 20MW e está localizada no complexo de Sanlúcar la Mayor, Sevilla, Espanha. A PS20 entrou em operação no ano de 2009.

A PS20 conta com 1255 heliostatos, também projetados pela Abengoa solar, refletindo a radiação para uma torre de 164 metros. Apresenta algumas melhorias com relação a usina PS10, como por exemplo, o receptor mais eficiente, além de melhorias no sistema de controle operacional e um sistema de armazenamento de energia melhorado.

A torre PS20 produz eletricidade suficiente para suprir a demanda de 10.000 domicílios, evitando, anualmente uma emissão de cerca de 12.000 toneladas de CO₂ para a atmosfera, ou seja, o dobro da torre PS10. Na Tabela 4 é mostrado os dados básicos importantes da usina PS20.

Tabela 4 - Dados da usina PS20.

Componente	Informação
Tecnologia	Torre Solar
Status	Operação
País	Espanha
Área	0,8 km ²
Recurso Solar	2,012 kWh/m ² /ano
Potência Instalada	20 MW
Geração de Energia	48,000 MWh/ano
Fator de Capacidade	27%
Custo	27 centavos de euro por kWh
Armazenamento	Outro (1h)
Início de Operação	2009
Fluido de Transferência	Água
Receptor	Cavidade
Donos	Abengoa Solar

Fonte – NREL.

4.2.2 USINA DE RECEPTOR CENTRAL NA ESPANHA

Gemasolar é uma usina com tecnologia de receptor central de torre e sistema de armazenamento em sais fundidos, localizada em Andaluzia, Espanha. Esta usina dispõe de um campo de 1,95 km², e o receptor se encontra em uma torre central de 140m de altura e 2650 heliostatos, cada um com 120m², rodeando a torre. Custou cerca de 325

milhões de dólares, sendo originado por uma joint venture entre a Abu Dhabi's Masdar Energy e a Sener, empresa espanhola de engenharia e construção.

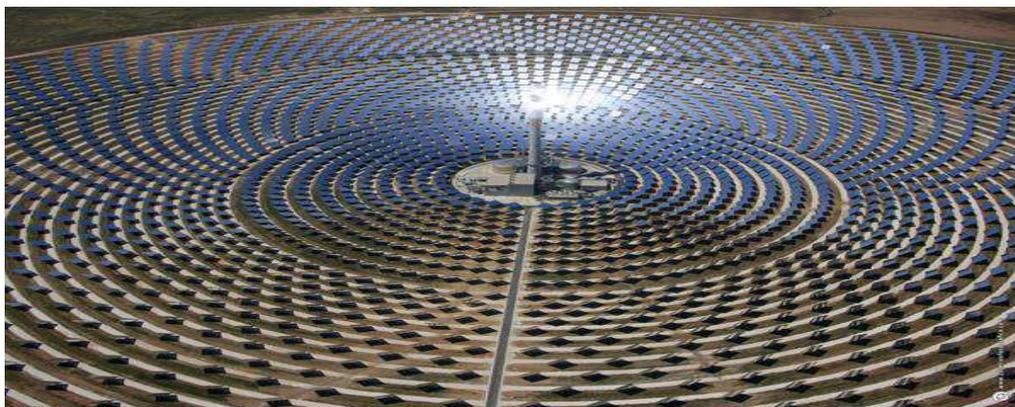
Sua potência instalada é de 19,9 MW, sendo capaz de fornecer 80 GWh de energia anualmente, capaz de abastecer cerca de 27.500 residências, reduzindo também a emissão de 30.000 toneladas de CO₂.

Esta usina é muito importante pois é a primeira a atingir o objetivo de uma usina solar, ser capaz de produzir energia 24 horas por dia e 7 dias na semana, inclusive em momentos de escuridão, em que não se tem a presença de raios solares.

O segredo desta usina está na utilização de tanques de sal derretido, assim é possível que a energia continue sendo gerada 24 horas por dia. Este sal derretido consiste de 60% de nitrato de potássio e 40% de nitrato de sódio, isto faz com que seja possível gerar energia por 15 horas sem a presença dos raios solares, fazendo com que seja suficiente para dias nublados e também para o período da noite.

O fato da usina Gemasolar ser capaz de produzir energia 24 horas por dia, faz com que ela seja maior que os outros tipos de tecnologia em uma instalação de mesma potência. A energia gerada é enviada por meio de uma linha de alta tensão para a subestação de Villanueva del Rey (Andaluzia, Espanha), onde será injetada na rede.

Figura 24 - Usina Gemasolar na Andaluzia.



Fonte – Torresolenergy , 2016.

Na Tabela 5 é apresentado alguns dos dados referentes a usina Gemasolar, obtidos do National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Tabela 5 - Dados da usina Gemasolar.

Componente	Informação
Tecnologia	Torre Solar
Status	Operação
País	Espanha
Área	1,95 km ²
Recurso Solar	2,100 kWh/m ² /ano
Potência Instalada	19,9 MW
Geração de Energia	80,000 MWh/ano
Fator de Capacidade	45,8%
Custo	230,000,000 Euros
Armazenamento	Sais Fundidos (15h)
Início de Operação	2009
Fluido de Transferência	Sais fundidos
Receptor	Cavidade
Donos	MASDAR (40%), Sener (60%)

Fonte – NREL.

4.2.3 USINA DE TORRE SOLAR NA CALIFÓRNIA

A usina de IVANPAH está localizada no deserto de Mojave na Califórnia, distante 64 km a sudoeste de Las Vegas. A usina utiliza a tecnologia de geração de torre solar, possui 173.500 heliostatos, com aproximadamente 15 m², cada um com dois espelhos, cada um destes espelhos é controlado por software, e direciona todos os raios solares absorvidos para três torres solares, com altura de 140 metros cada uma, e ocupa uma área de 3500 acres.

A construção da usina custou cerca de 2,2 bilhões de dólares, investimento conjunto do Google e das empresas BrightSource e NRG Energy. Ela ocupa uma área de 1300 campos de futebol, distribuídos em 346 mil espelhos. Sua capacidade de geração é de 377 MW, capaz de fornecer energia para abastecer cerca de 140 mil casas.

Os 377 MW nominais são produzidos pelas três unidades que constituem o projeto:

- Ivanpah 1: 126 MW;
- Ivanpah 2: 133 MW;
- Ivanpah 3: 133 MW;

Durante sua construção, contou com cerca de 2636 trabalhadores da construção civil e de apoio. O projeto promoveu ainda a criação de empregos para a fabricação dos equipamentos necessários para a construção da usina, criando postos de trabalho em 17 estados americanos.

Ivanpah utiliza o ar para arrefecer e condensar o vapor, isto faz com que a quantidade de água utilizada se reduza significativamente ao se comparar com sistema de refrigeração que utiliza água para condensação. Os 140 mil domicílios que passaram a utilizar a energia de Ivanpah, deixaram de gerar cerca de 400 mil toneladas métricas de CO₂ por ano, o equivalente a retirar 72 mil veículos das ruas.

Figura 25 - Usina de Ivanpah.



Fonte: Exame Abril, 2014.

Em 2016 a usina sofreu um incêndio, provavelmente devido a espelhos desalinhados, o que fez com que a mesma operasse com a capacidade reduzida. Para apagar o incêndio não foi fácil, os bombeiros tiveram que subir 90 metros em uma torre de caldeira para chegar ao local pois o fogo estava localizado a dois terços da altura da torre. O fogo foi extinto cerca de 20 minutos depois de ter começado.

Na Tabela 6 é possível observar alguns dados referentes à usina de Ivanpah, retirados do site da NREL.

Tabela 6 - Dados da usina de Ivanpah.

Componente	Informação
Tecnologia	Torre Solar
Status	Operação
País	Califórnia, Estados Unidos
Área	14,164 km ²
Recurso Solar	2,717 kWh/m ² /ano
Potência Instalada	377 MW
Geração de Energia	1,079,232 MWh/ano
Fator de Capacidade	31%
Custo	2,2 bilhões de dólares
Armazenamento	Não possui
Início de Operação	2014
Fluido de Transferência	Água
Receptor	-
Donos	NRG Energy, BrightSource Energy, Google

Fonte – NREL.

4.3 PROJETOS EM IMPLANTAÇÃO

4.3.1 USINA DE NEVADA

A SolarReserve tem um projeto para construção de uma usina que será nos Estados Unidos, no deserto de Nevada. Esta irá gerar entre 1500 e 2000 MW, capacidade de abastecer 1 milhão de lares. Com o passar do tempo, vem se construindo usinas com capacidade cada vez maior, o que faz com que o título de maior seja passado de uma para outra com frequência.

No momento, o título de maior usina solar térmica é a de Ivanpah, que se encontra nos Estados Unidos, mais especificamente na Califórnia, com capacidade de 377MW.

Serão utilizados cerca de 100.000 heliostatos para realizar a reflexão dos raios solares para concentrá-los no receptor central de 10 torres. O fluido de transferência utilizado será o sal fundido, que também será utilizado como sistema de armazenamento para a usina.

A usina estará fornecendo energia durante 24 horas, não irá parar durante a noite, pois durante o dia a energia captada pelos heliostatos é acumulada em sais para

transformar em energia nas próximas horas. A construção irá gerar cerca de 3000 empregos, levará sete anos para ser concluída e começará daqui a dois ou três anos.

O projeto custará cerca de 5 bilhões de dólares, a empresa já tem em mãos uma central de 260MW de potência, que começará a atuar em 2019.

4.3.2 USINA HELIOTERMICA DA CHINA

A Administração Nacional de Energia (NEA) da China emitiu o plano para o desenvolvimento da energia solar no país no dia 16 de dezembro de 2016, em que busca aumentar consideravelmente a produção de energia elétrica através da energia solar.

A partir disso, a província chinesa de Qinghai, que se localiza em uma das regiões com melhores condições climáticas para instalação de usinas heliotermicas é onde ficará localizada as seis torres solares de 135 MW cada, totalizando 810MW. A empresa, Bright Source, que ficará responsável pelo projeto Delingha, é a mesma que construiu a atual maior usina heliotermica do mundo, a usina de Ivanpah na Califórnia, com capacidade de produção de 377MW.

Na primeira fase do projeto Delingha, serão construídas duas torres que totalizam uma produção de 270 MW, em uma área de 13 km². Para o armazenamento de energia, estas torres utilizarão sal fundido para até 3,5 horas de produção elétrica durante a noite ou dias nublados. Construção está prevista para terminar em 2017.

A China é o maior emissor de gases causadores do efeito estufa, a produção de energia solar visa a diminuição desta emissão e com isso mostrar o compromisso do país com as energias renováveis.

4.3.3 COMPLEXO DE NOOR

O Complexo de Noor (palavra que em árabe, significa luz), localizado no norte da África, na cidade de Ouarzazate, em Marrocos, contribuirá com 18% na geração anual de energia do país, faz parte do programa que visa aumentar a capacidade de energia solar até 2020. Os projetos para geração solar se deram a partir da meta anunciada em 2015, para gerar 52% de sua energia por meio de fontes renováveis até 2030.

O complexo contará com 4 usinas, diferenciando entre elas o tipo de tecnologia utilizada para geração de energia. A usina Noor I, que se encontra em operação desde dezembro de 2015, com capacidade de 160 MW, são dispostas 400 fileiras de 300 metros

de comprimento com 537.000 espelhos parabólicos e armazenamento térmico para três horas.

A usina Noor II, também contará com a tecnologia de espelho parabólico, porém, com potência prevista para 200 MW e com armazenamento maior que a primeira. Para a construção da usina Noor III, será utilizada a tecnologia de torre solar, utilizando uma torre de 240 metros para absorver os raios refletidos pelos heliostatos, e com capacidade de geração de 134 MW. Para a construção da Noor IV, a responsável pelo complexo, Agência Marroquina de Energia Solar (MASEN), abriu leilão, a expectativa é de que seja uma usina de energia fotovoltaica.

Para que o projeto fosse colocado em prática, foi realizado a compra de um terreno de uma tribo local e os recursos foram reinvestidos em um plano de desenvolvimento social para melhoria dos serviços sociais nas comunidades vizinhas. Além disso, dos 1800 trabalhadores na construção, mais de 1500 são marroquinos, e as horas e condições de trabalho são regidas pelas normas da Organização Internacional do Trabalho (OIT).

Na Tabela 7 são demonstrados alguns dados referentes a usina Noor III, a partir de dados obtidos da NREL.

Tabela 7 - Dados da usina Noor III.

Componente	Informação
Tecnologia	Torre Solar
Status	Em Construção
País	Marrocos
Área	-
Potência Instalada	134 MW
Geração de Energia	-
Fator de Capacidade	-
Custo	\$0,15/kWh
Armazenamento	Sais Fundidos (7h)
Início de Operação	Final de 2017
Fluido de Transferência	Sais Fundidos
Receptor	-
Donos	-

Fonte – NREL.

4.3.4 USINA DE ISRAEL

No meio do deserto de Neguev, em Israel, chamada de Ashalim, a central de energia solar concentrada (CSP) contará com uma torre de 240 metros, sendo considerada a torre mais alta do tipo no mundo e com capacidade para abastecer cerca de 120 mil famílias. O projeto nasceu em 2013, com previsão de término para fim de 2017 e operação para início de 2018, faz parte do plano do governo de alcançar uma meta de energia renovável de 10% até 2020.

A usina utiliza cerca de 50.000 heliostatos controlados por computador, medindo até 20 metros quadrados cada, que serão instalados em mais de 3 quilômetros quadrados. Sua capacidade de geração é de 300 MW, cerca de 2% da produção de eletricidade de Israel. A central solar ainda evitará também a emissão de cerca de 110.000 toneladas de CO₂ por ano.

O fato de se utilizar uma torre central deste tamanho não se dá com intuito de quebra de recorde, e sim devido ao governo ter imposto uma utilização máxima do terreno e para isso os heliostatos devem estar mais próximos da torre, e quanto mais próximo da torre estiverem, maior terá que ser a torre.

4.3.5 USINA DE DUBAI

A Dubai Water and Electricity Authority elaborou um projeto com cinco instalações, localizadas dentro do parque solar de Mohammed Bin Rashid Al Maktoum. Até o fim de 2020 e começo de 2021, o projeto deverá ter concluído sua primeira fase e terá capacidade de geração de 1000 MW, até 2030, esta capacidade deve ser 5 vezes maior.

Esta usina faz parte do projeto de Dubai de ter como principal fonte de energia, a energia solar, até 2050. O preço da energia deverá ter uma queda de 15 centavos de dólar por quilowatt-hora (kWh) para 8 centavos. Além de evitar a emissão de 6,5 milhões de toneladas de CO₂ por ano.

Dubai pretende ainda fazer uso de placas fotovoltaicas nas coberturas de seus edifícios até 2030, e até 2050, ter 75% de toda a eletricidade produzida por fontes renováveis. Serão investidos US\$ 27 bilhões que serão utilizados para programas que tornem os sistemas solares mais competitivos, como forma de incentivo.

4.3.6 USINAS NO BRASIL

No Brasil, o projeto SMILE (Sistema Solar Híbrido com Microturbina para Geração de Eletricidade e Cogeração de Calor na Agroindústria), tem como objetivo a construção de duas usinas que utilizam a tecnologia de torre solar.

Estas usinas terão capacidade de geração de 100 KW e serão construídas nas cidades de Pirassunga, São Paulo, e em Caiçara do Rio, Rio Grande do Norte. Utilizarão o ar como fluido de trabalho e suprirá as necessidades elétricas e de calor de processo, sendo construídas com possível implementação no futuro.

A usina será híbrida, como forma de auxílio em momentos de baixa ou falta de radiação solar, serão instaladas caldeiras movidas a biodiesel para esse sistema de geração híbrida. A planta do Rio Grande do Norte terá finalidade comercial, de propriedade da Solinova, empresa nascida na USP em 2008, será composta de 75 heliostatos. Já para a planta de São Paulo, terá finalidade apenas de pesquisa de propriedade da Universidade de São Paulo.

O projeto será financiado pelo BNDES e parceiros, será coordenado pelo grupo de pesquisa GREEN/USP (Grupo de Pesquisa em Reciclagem, Eficiência Energética e Simulação Numérica) do Docente Professor Dr. Celso Eduardo Lins de Oliveira, e executado pela empresa Solinova em conjunto com o Centro Aeroespacial Alemão DLR.

Segundo o coordenador do projeto (OLIVEIRA, 2017)¹, o projeto de implantação das usinas está em andamento, com previsão de início de funcionamento no término de 2017.

¹ OLIVEIRA, C. E. L. de. **Re: Projeto SMILE** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <antonio.moura@ee.ufcg.edu.br> em 3 de abril de 2017.

5 CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO

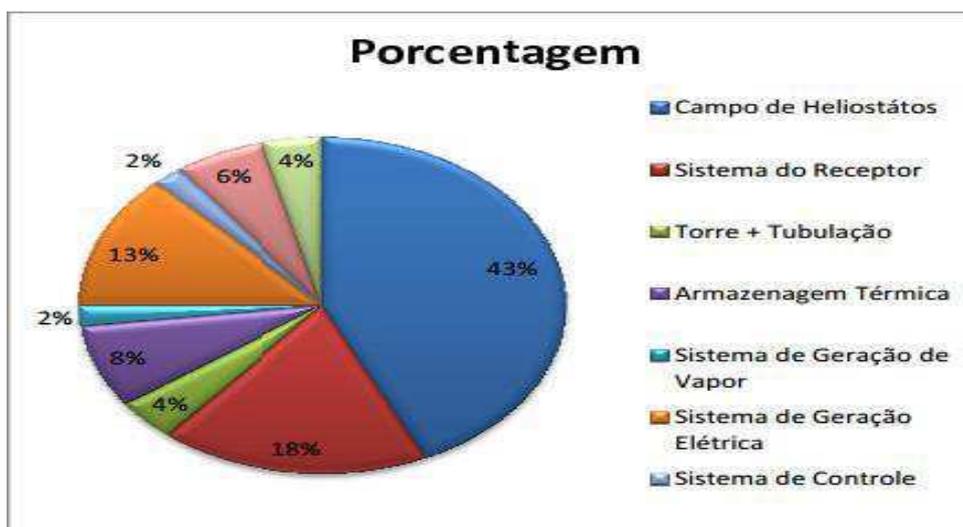
A tecnologia de coletores Cilindros Parabólicos, obtiveram ao longo dos anos uma competitividade superior em relação aos outros tipos de tecnologias termo solares. Todavia, é possível perceber que a tecnologia de torre solar vem tendo um crescimento de redução de custos considerável.

É possível realizar a análise dos custos de implantação de uma usina heliotermica sob duas formas diferentes. A primeira é vista por meio do setor público, este se preocupa em manter um equilíbrio entre o financeiro e o socioambiental. Já para o segundo ponto de vista, setor privado, este não terá a mesma preocupação, levando em consideração como ponto principal para construção de uma usina, o tempo de retorno do investimento.

5.1 CUSTOS DE INVESTIMENTO

Para implantação de uma usina heliotermica, percebe-se que o componente que apresenta o maior gasto são os heliostatos. Na Figura 26, percebe-se que ele ocupa cerca de 43% do orçamento, seguido pelo receptor com 18% e o bloco de potência (gerador e turbina) com 13%.

Figura 26 – Porcentagem dos custos de investimento para componentes.

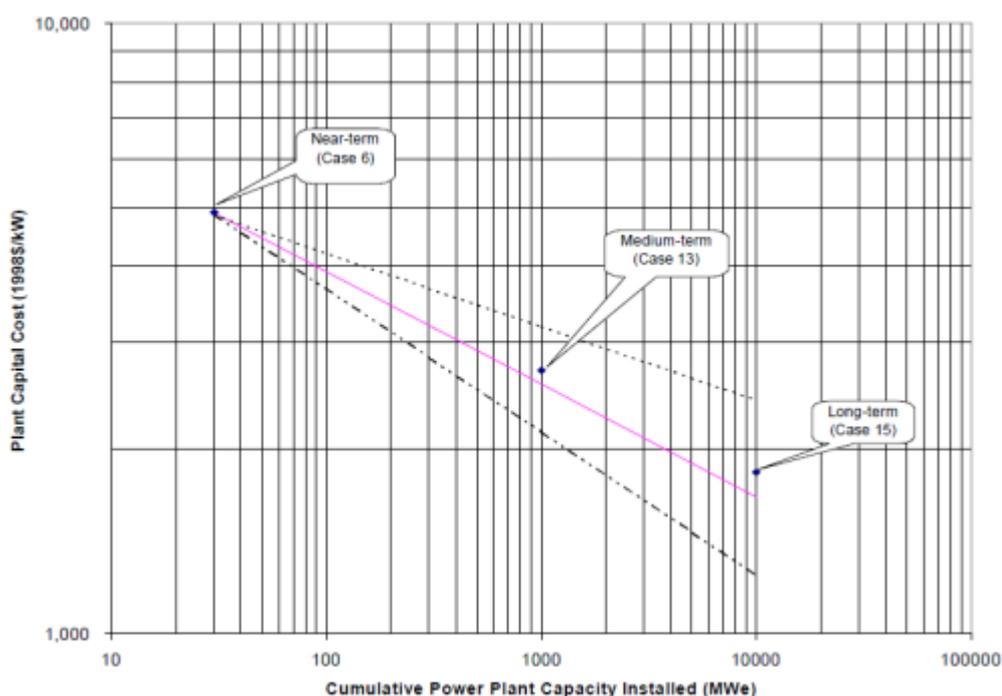


Fonte – Sargent and Ludy Consulting Group.

5.2 CURVA DE EXPERIÊNCIA

A curva de experiência, irá demonstrar como o custo pode ser reduzido de acordo com o aumento da produção de energia. Observa-se que o custo declina constantemente a medida que o número total de unidades produzidas é dobrado (Price e Stephen 1999). Na Figura 27 é demonstrado como se comporta uma curva de aprendizagem, demonstrando o custo da planta com relação a potência instalada.

Figura 27 – Curva de aprendizagem.



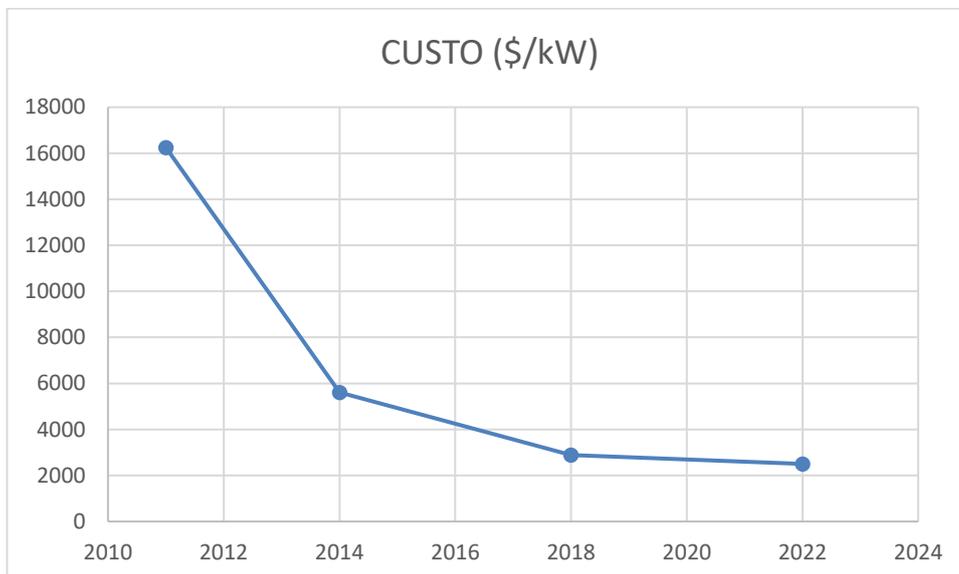
Fonte – Enermodal Engineering Limited.

5.3 ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DOS CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO

Analisando a evolução do custo de instalação de uma planta heliotérmica, utilizando tecnologia torre central, pode-se observar um aumento considerável na potência instalada ao longo dos anos, também é possível observar, a partir da Figura 28, que o custo total de implantação destas plantas está diminuindo, o que demonstra que a evolução tecnológica está promovendo um melhor aproveitamento dos raios solares, ou seja, a geração termo solar está se tornando cada vez mais competitiva com os demais

tipos de geração, uma vez que com este tipo de tecnologia é possível realizar o armazenamento de energia para se aproveitar em momentos dias de baixa radiação solar, assim como durante a noite.

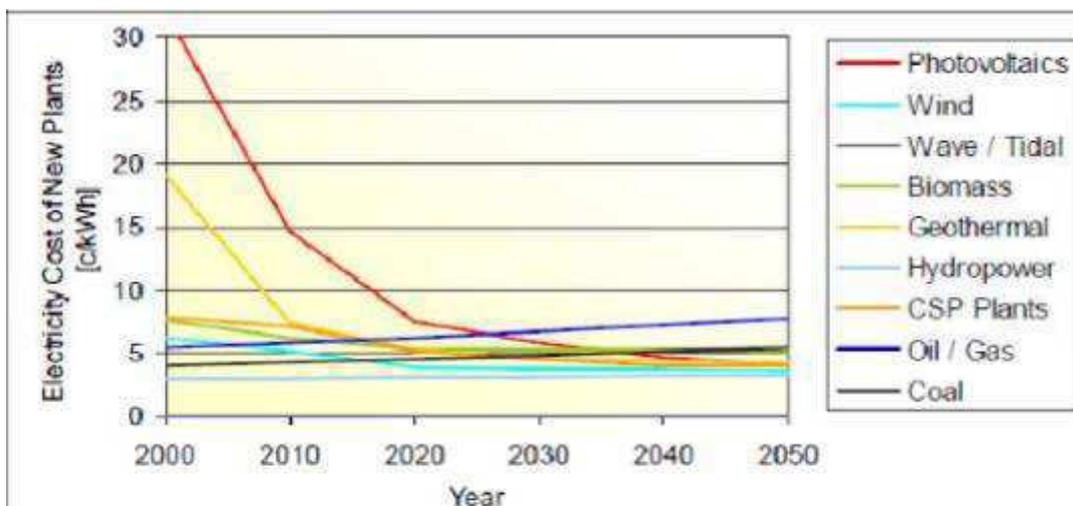
Figura 28 – Custo de implantação de uma usina heliotérmica com tecnologia receptor central.



Fonte – O Autor (2017).

Uma planta solar térmica, apresenta uma série de vantagens com relação aos demais tipos de geração de energia ao se levar em consideração o nível de emissão de poluentes, gastos para capturar esses gases, dentre outros fatores ambientais. Na Figura 29 de (Charles, Davis e Smith 2005), é demonstrado uma comparação entre os custos da eletricidade para plantas convencionais e renováveis. Também é possível observar, realizando uma comparação com o gráfico anterior, que a queda na diferença entre os custos previstas para o ano de 2022 em diante, se encontra no momento em uma queda mais acentuada, evidenciando que esta competitividade fica cada vez mais acirrada.

Figura 29 - Comparação do custo da eletricidade para plantas convencionais e renováveis.



Fonte – (Charles, Daves e Smith 2005).

Na Tabela 8 é demonstrado em que essa redução nos custos de implantação das plantas das usinas termo solares podem ser baseadas em alguns fatores, dentre eles: Melhorias tecnológicas, Fator de Escala e Volume de Produção. As Melhorias Tecnológicas podem ser diversas, de forma que estas, melhorem o aproveitamento dos raios solares pela usina. O Fator de Escala diz respeito ao aumento ou diminuição do tamanho dos componentes da central, já o Volume de Produção se relaciona com a quantidade de componentes que são produzidos.

Tabela 8 - Principais melhorias para redução do custo de investimento em uma planta de receptor central.

Componentes	Melhorias Tecnológicas	Fator de Escala	Volume de Produção
Coletores	<ul style="list-style-type: none"> - Espessura do espelho; - Aumento da Refletividade; - Melhores Práticas de manutenção; - Sistemas de controle Melhorados. 	<ul style="list-style-type: none"> - Crescimento do tamanho dos heliostátos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento médio da produção dos heliostatos.

Bloco de Potência Elétrica	<ul style="list-style-type: none"> - Melhores fluidos de transferência; - Melhorias na eficiência do gerador de energia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Projeção de aumento da potência instalada. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento no volume de produção tem pouca influência sobre o custo do Bloco de Potência Elétrica.
Receptor	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento da absorção do receptor; - Diminuição da absorção nos materiais de revestimento; - Melhorias no isolamento para reduzir as perdas térmicas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento do tamanho da área do receptor. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento no volume de produção tem pouca influência sobre o custo do receptor.
Armazenamento Térmico	<ul style="list-style-type: none"> - Melhores matérias para armazenamento como o sal fundido; - Melhoria no isolamento dos tanques. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento do tamanho dos tanques e do tempo médio de armazenamento de 16 horas para 17 horas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento no volume de produção tem pouca influência sobre o custo do armazenamento térmico.
Gerador de Vapor	<ul style="list-style-type: none"> - Melhorias na tubulação do evaporador; - Aumento na eficiência da bomba; - 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento da Capacidade de geração de vapor a uma temperatura de 650 °C. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento no volume de produção tem pouca influência sobre o custo do gerador de vapor.

Fonte – (Sargent and Ludy Consulting Group 2003).

6 CONCLUSÃO

A utilização das energias renováveis tem se mostrado cada vez mais necessária no mundo todo. Por meio dela é possível realizar uma diminuição considerável da poluição liberada na atmosfera. Este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo o estudo da geração de energia termo solar, utilizando a tecnologia de “Torre Solar”.

Foi realizado um estudo do funcionamento de cada componente da usina de tecnologia “Torre Solar”, mostrando a importância de cada um para a planta e suas características. As plantas de tecnologia de concentração solar podem ser instaladas em regiões inóspitas, quentes e secas, estando distante dos centros de consumo, o que é uma desvantagem devido a necessidade de criação de grandes linhas de transmissão.

A partir do levantamento das plantas em operação, construção, assim como das plantas planejadas para iniciar sua construção um pouco mais a frente, foi possível observar que ocorreu um aumento considerável da capacidade instalada nas usinas, assim como da eficiência energética das mesmas.

Com o estudo, pôde-se notar que a evolução da tecnologia está fazendo com que a energia solar adquira competitividade com relação às outras formas de geração de energia, principalmente devido ao fato de que a energia termo solar está adquirindo cada vez mais uma capacidade de armazenamento maior, o que faz com que as usinas possam produzir energia mesmo em dias de baixa radiação solar e também durante a noite.

Percebeu-se ainda que o custo total para implantação de uma usina que utiliza tecnologia Torre Solar teve uma queda acentuada ao longo dos anos, e com previsão de maiores quedas para os próximos anos com o avanço da tecnologia. Este fator também faz com que a geração termo solar adquira competitividade em relação aos outros tipos de geração de energia.

Conclui-se, então, que a tecnologia tem demonstrado um grande potencial de evolução, que pode ser acentuado com a realização de mais investimentos na área, fazendo com que seja possível aumentar a capacidade instalada nas plantas ainda mais, além de poder fazer com que o decaimento do custo total de instalação se dê de forma mais rápida.

REFERÊNCIAS

AMBIENTE ENERGIA. **Dubai anuncia maior projeto de energia heliotérmica do mundo**. Disponível em: <<https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2016/12/dubai-anuncia-maior-projeto-de-energia-heliotermica-mundo/30879>>. Acesso em: Março de 2017.

BEIGELMAN, B.B. **A energia solar fotovoltaica e a aplicação na usina de Tauá**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

BLOGTHINKBIG. **Esta futura usina fornecerá energia a um milhão de lares**, 2016. Disponível em: <<http://br.blogthinkbig.com/2016/10/30/esta-futura-usina-solar-fornecera-energia-a-um-milhao-de-lares/>>. Acesso em: Março de 2017.

BUCK, R., GIULIANO, S., GOBEREIT, B., PFAHL, A., PUPPE, M., SCHWARZBÖZL, P., UHLIG, R. **Tower CSP technology – State of the art and market overview**. 2014.

CASTRO, L. C. **Análise Comparativa para Geração de Energia Heliotérmica em diferentes Regiões brasileiras**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília, 2014.

ENERGIA HELIOTÉRMICA. **China Planeja o maior projeto heliotermico do mundo**, 2015. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/noticias/483-com-810mw-china-planeja-o-maior-projeto-heliotermico-do-mundo>>. Acesso em: Fevereiro de 2017.

ENERGIA HELIOTÉRMICA. **Complexo de Noor, no Marrocos, será a maior usina solar do mundo**, 2015. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/noticias/440-complexo-noor-no-marrocos-sera-a-maior-usina-solar-do-mundo>>. Acesso em: Março de 2017.

ENERGIA HELIOTÉRMICA. **Dois torres solares serão construídas no Brasil em 2016**, 2015. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/noticias/489-duas-torres-solares-serao-construidas-no-brasil-em-2016>>. Acesso em: Março de 2017.

ENERGIA HELIOTÉRMICA. **Israel constrói maior torre heliotérmica do mundo**, 2017. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/noticias/630-israel-constroiu-maior-torre-heliotermica-do-mundo>>. Acesso em: Março de 2017.

ENERGIA HELIOTÉRMICA. **Onde existem Usinas Heliotermicas**. Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/fatos/onde-existem-usinas-heliotermicas>>. Acesso em: Fevereiro de 2017.

EXAME ABRIL. **Israel constrói maior torre de energia solar do mundo**, 2016. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/mundo/israel-constroiu-maior-torre-de-energia-solar-do-mundo>>. Acesso em: Março de 2017.

EXPLICATORIUM. **Células fotoelétricas**. Disponível em: <<http://www.explicatorium.com/sociedade/celulas-fotoeletricas.html>>. Acesso em: Fevereiro de 2017.

LEAL, S. D. B. **Geração Solar Térmica: o Caso da Usina de Ivanpah**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Campina Grande, 2015.

MADEIRA, R. A. **Custos Associados à Energia Termo Solar de Receptor Central**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

MALAGUETA, D.C. **Geração Heliotérmica: Princípios e Tecnologias**, 2012.

MARANHÃO, I. M. **Estudo Sobre a Tecnologia Heliotérmica e sua Viabilidade no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília, 2014.

MARCONI, M.A; EVA, M.L. **Fundamentos de metodologia científica**. 7.ed.São Paulo: Atlas, 2010.

OLIVEIRA FILHO, C. M. de. **Metodologia para Estudo de Implantação de uma Usina Heliotérmica de Receptor Central no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

PORTAL BRASIL. **Brasil estará entre os 20 países com maior geração solar em 2018**, 2016. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/01/brasil-estara-entre-os-20-paises-com-maior-geracao-solar-em-2018>>. Acesso em: Janeiro de 2017.

PORTAL BRASIL. **Energia solar representará 4% da potência total até 2024**, 2015. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2015/10/energia-solar-representara-4-da-potencia-total-ate-2024>>. Acesso em: Janeiro de 2017.

PORTAL ENERGIA. **Vantagens e Desvantagens da Energia Renovável**, 2016. Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-das-energias-renovaveis/>>. Acesso em: Janeiro de 2017.

SOUSA, Y. R. de. **Estudo Comparativo Entre Tecnologias de Energia Solar Térmica: Cilindro Parabólico vs. Receptor Central**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Campina Grande, 2015.

TAVARES, R. F. A. M. **Geração Heliotérmica: Avaliação do impacto da utilização de novos fluidos no custo da energia gerada**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.