

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA ELÉTRICA**

CÁSSIO CARDOSO CARVALHO

**FONTES HELIOTÉRMICAS: UM ESTUDO SOBRE O
FUNCIONAMENTO E O POTENCIAL DE IMPLEMENTAÇÃO NO
BRASIL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

CÁSSIO CARDOSO CARVALHO

**FONTES HELIOTÉRMICAS: UM ESTUDO SOBRE O
FUNCIONAMENTO E O POTENCIAL DE IMPLEMENTAÇÃO NO
BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof^a. Msc. Annemarlen Castagna

CURITIBA

2016

Cássio Cardoso Carvalho

FONTES HELIOTÉRMICAS: UM ESTUDO SOBRE O FUNCIONAMENTO E O POTENCIAL DE IMPLEMENTAÇÃO NO BRASIL

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

Curitiba, 13 de junho de 2016

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

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

ORIENTAÇÃO

Annemarle Gehrke Castagna, Mestre.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Annemarle Gehrke Castagna, Mestre.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Alvaro Augusto W. de Almeida, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gerson Maximo Tiepolo, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dedico a meus pais João Raimundo e Terezinha, minha irmã Caroline e a todos os amigos que sempre estiveram presentes.

RESUMO

CARVALHO, Cássio Cardoso. **Fontes heliotérmicas: um estudo sobre o funcionamento e o potencial de implementação da tecnologia no Brasil**. 2016. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Industrial Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

A crise energética vivida pelo país nos últimos anos, trouxe à tona o debate sobre a necessidade da diversificação da matriz energética brasileira. Os últimos dados de capacidade instalada dão conta de que as hidrelétricas e as térmicas ainda são majoritárias no sistema, contudo as fontes alternativas de energia vêm ganhando espaço, mesmo que tímido, no cenário nacional. Esse trabalho traz uma revisão literária de uma fonte alternativa de energia, que vêm ganhando interesse em diversos países ao redor do mundo, porém no Brasil ainda é uma aposta, a fonte heliotérmica ou CSP (*Concentrated Solar Power*). Seu princípio de funcionamento se dá com a utilização de espelhos que refletem a radiação solar em um receptor pontual, a fim de aquecer um fluido que trocará calor com a água, gerando vapor e acionar uma turbina que acionará um gerador, um processo semelhante com um modelo convencional de uma termoelétrica. A fonte heliotérmica consiste de quatro modelos de tecnologia, as quais estão sendo abordados separadamente ao longo do trabalho, onde se mostra seu princípio de funcionamento e suas vantagens. Buscou-se também, identificar com ajuda de outros trabalhos e pesquisas, regiões brasileiras que sejam favoráveis para a implementação dessas fontes, regiões essas que conforme mostrado adiante no trabalho, são a região do semi árido nordestino, parte do centro oeste brasileiro e também o sudeste. Conclui-se que o Brasil, tem um rico potencial para implementação de fontes heliotérmicas, pois sua região é mais rica em termos de radiação solar do que até mesmo países que já usam essa fonte em larga escala. Contudo será preciso se investir em matéria prima tecnológica e maior incentivo na indústria.

Palavras-chave: Fonte heliotérmica; energia solar; CSP;

ABSTRACT

CARVALHO, Cássio Cardoso. **Heliotérmicas sources: a study on the operation and the potential implementation of technology in Brazil.** 2016. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Industrial Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

The energy crisis by the country experienced in recent years, due to the predominance of hydraulic and thermal sources, brought to the fore the debate on the scope of the Brazilian energy sources. The latest capacity data realize than hydroelectric and thermal are still majoritarian arrays in the system, yet the alternative energy sources are gaining space, even shy, the national scene. This paper presents a literature review of an alternative source of energy is gaining notoriety in than several countries around the world, but in Brazil is still a bet, the heliothermic source or CSP (Concentrated Solar Power). Its working principle is with the use of mirrors that reflect the solar radiation in a timely receiver in order to heat a fluid that will exchange heat with the water, thus generating steam and drive a turbine which triggers a generator, a process similar to a conventional model of a thermoelectric plant , but with another array. The heliothermic source consists of four models of technology, which are being addressed separately throughout the work, which shows its working principle and its advantages. We sought to identify with the help of other work and research, Brazilian regions that are favorable to the implementation of these sources, regions such that as shown on the work, are the regions semi arid region northeastern, the Brazilian midwest and also the southeast. It concludes that Brazil has a rich potential for implementing heliothermics sources because their region is richer in terms of solar radiation than even countries that already use this source on a large scale. However you will need to invest in press technology is concerned and greater incentive industry.

Keywords: Heliothermic source; solar source; CSP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Componentes da radiação solar: direta, difusa e devido ao albedo.....	21
Figura 2: Capacidade instalada (MW) em nível global 2007-2012.....	23
Figura 3: Total da capacidade instalada por países.....	24
Figura 4: Divisão de tecnologia de projetos CSP.....	28
Figura 5: Capacidade instalada de CSP.....	29
Figura 6: Planta de CSP desenvolvida de calhas parabólicas, na Espanha.....	30
Figura 7: Ilustração de uma planta com tecnologia de calha parabólica.....	31
Figura 8: Princípio de uma calha parabólica.....	33
Figura 9: Desenho esquemático do refletor Fresnel.....	34
Figura 10: Esquema de instalação e funcionamento de uma Torre Solar.....	36
Figura 11: Planta CSP Torre Solar, instalada na Espanha, contando com 624 heliostatos.....	37
Figura 12: Planta existente na Índia, com 84 receptores.....	39
Figura 13: Desenho esquemático do disco parabólico.....	39
Figura 14: Mapa brasileiro de energia solar direta.....	43
Figura 15: Mapa brasileiro de energia solar direta.....	44
Figura 16: Mapa com o total anual de irradiação direta normal (HDIRN) em kWh/m ² /ano, no Brasil.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Matriz da capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil, Fevereiro 2016.	10
Tabela 2 - Fator de capacidade de tecnologias, de acordo com o armazenamento .	25
Tabela 3 – Características de cada tecnologia CSP.	27
Tabela 4: Potencial de geração no Brasil.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
CRS – Central Receiver System
CSP – Concentrated Solar Power
DNI – Direct Normal Irradiance
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
GW – Gigawatts
kW - Kilowatts
LFR – Linear Fresnel Reflectores
MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.
MME – Ministério das Minas e Energias
MW – Megawatts
US\$/kWh – Dólar por kilo watts hora
UA – Unidade astronômica, distância média da Terra ao Sol
G – Irradiância Solar
 G_{HOR} – Potência radiante solar
 G_{DIR} – Irradiância solar incidente em um superfície
 G_{DIF} – Potência radiante do céu
 G_{TOT} – Potência radiante solar
 kW/m^2 – Irradiação
H – irradiação solar
 H_{HOR} – Irradiação global
 H_{DIF} – Irradiação difusa
 G_{ALB} – Irradiância devido ao albedo
 H_{TOT} – Irradiação total
 H_{DIR} – Irradiação direta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	11
1.2 PROBLEMA E PREMISSA	13
1.3 OBJETIVO	14
1.3.1 Objetivo Geral	14
1.3.2 Objetivos Específicos.....	14
1.4 JUSTIFICATIVA.....	14
1.5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	15
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 A ENERGIA SOLAR	17
3 TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO HELIOTÉRMICA.....	22
3.1 CILINDRO PARABÓLICO.....	29
3.2 REFLETOR LINEAR FRESNEL	33
3.3 TORRE SOLAR	35
3.4 DISCO PARABÓLICO	37
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
4 O POTENCIAL HELIOTÉRMICO NO BRASIL	41
4.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
5 CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

O Brasil vem enfrentando uma crise energética nos últimos anos, devido a vários fatores, como: falta de chuvas; o aumento na demanda do consumo de energia elétrica decorrente do progresso tecnológico e do avanço no desenvolvimento humano; dependência majoritária de fontes hidráulicas e térmicas; e também pelo fato de que o país venha apenas na última década, investindo em geração de energia elétrica através de fontes alternativas de energia, como fonte solar (em menor intensidade) e fonte eólica, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Matriz da capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil, Fevereiro 2016.

FONTE	Jan/2015	Jan/16			Evolução da capacidade instalada entre Jan/2015 e Jan/2016
	Capacidade instalada(MW)	Nº usinas	Capacidade instalada(MW)	% Capacidade instalada	
Hidráulica	89.227	1.220	92.100	65,00%	3,20%
Térmica	39.786	2.996	41.595	29,40%	4,50%
Gás natural	12.776	149	12.439	8,78%	-2,60%
Biomassa	12.341	520	13.277	9,37%	7,60%
Petróleo	9.085	2.192	10.124	7,15%	11,40%
Carvão	3.593	22	3.612	2,60%	0,5%
Nuclear	1.990	2	1.990	1,40%	0,00%
Outros	0	31	153	0,11%	-
Eólica	4.981	330	7.968	5,60%	60%
Solar	15	34	21	0,00%	40,60%
Capacidade total – Brasil	134.008	4.500	141.684	100%	5,70%

Fonte: MME, 2016; (adaptado pelo autor).

Como mostra na Tabela 1, a principal fonte de geração de energia elétrica no Brasil é a hidráulica, que apesar de ser considerada uma fonte limpa e segura, produzem grande impacto ambiental devido à área alagada pelos reservatórios.

Contudo, o investimento em fontes alternativas e renováveis de energia, por parte do governo vêm sendo garantido, segundo relatórios do Ministério das Minas e Energia (MME), apresentado no boletim mensal de monitoramento do setor elétrico, em comparação com o ano de 2015, o país obteve, até fevereiro de 2016, um aumento de 50,1% na geração de energia solar, em comparação com a mesma data do ano anterior (MME, 2016).

As fontes de geração de energia elétrica renováveis, que estão em alto índice de crescimento no Brasil e que vem recebendo um maior volume de investimento, são as eólicas e solares, que representam respectivamente, 7.968,00 MW e 21,0 MW e juntas totalizam de 5,6% da capacidade total de energia instalada no Brasil (MME, 2016). Porém uma fonte que vem ganhando destaque no cenário energético mundial, embora no Brasil exista apenas um projeto piloto em desenvolvimento são as fontes heliotérmicas, também conhecida como CSP (Concentrated Solar Power).

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Esse trabalho tem por tema a energia heliotérmica, buscando identificar e analisar os diferentes processos existentes para geração de energia elétrica através de fontes heliotérmicas, bem como estudar o potencial brasileiro para implementação das mesmas. Essa fonte de energia renovável vem sendo estudada com bastante afinco em todo o mundo, e espera-se que possa ajudar o Brasil a construir e a investir em novas fontes alternativas de energia, buscando sempre maneiras mais eficientes e causando o menor impacto possível na natureza, tendo em vista que o Brasil pretende reduzir, segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2013), as emissões projetadas de gases com efeito estufa em 20% até 2020.

Diante do já explanado, objetiva-se identificar e mostrar o funcionamento das fontes heliotérmicas, trazendo todas as formas de geração estudadas até o momento, explanando sobre como produzir energia durante a noite, qual o custo da produção da mesma e quanta energia pode ser produzida. Também será abordada a viabilidade, no sentido de mostrar onde já existem usinas heliotérmicas, qual o potencial heliotérmico no Brasil, e o quão

viável é essa fonte energética, no que tange à segurança, à lucratividade e à redução de impacto ao meio ambiente, fazendo comparações estatísticas e também salientando a integração com outras fontes de energia.

A energia heliotérmica ou energia solar térmica concentrada (*CSP – Concentrated Solar Power*) é uma fonte de energia renovável, onde se transforma energia solar em energia térmica e subsequentemente em energia elétrica (TN SUSTENTÁVEL, 2015).

A grande vantagem da tecnologia heliotérmica é a possibilidade de armazenar energia elétrica em forma de calor. Assim, dependendo da tecnologia implementada, é possível gerar energia elétrica mesmo quando não há sol, em dias nublados ou durante a noite. Além disso, também é possível utilizar a tecnologia heliotérmica em conjunto com outros combustíveis, com a biomassa, o gás natural ou carvão, para garantir a produção de energia a qualquer momento (ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2015).

Conforme mostra a WinterGreen Research (2014), essa fonte energética sustentável é a mais promissora no mercado mundial, pois oferece energia e desempenho a preços competitivos, podendo chegar em 2020 a 53 milhões de dólares em investimentos em implementações de novas plantas em todo o mundo.

Embora a CSP dependa da disponibilidade de energia solar, que permite tanto armazenamento de energia térmica e de hibridação que resultam em fiável fornecimento de energia para a rede em qualquer momento do dia dependendo da sua capacidade de armazenamento, partes interessadas do setor energético brasileiro, parecem não apreciar plenamente as vantagens do CSP (GIZ, 2015).

Estudos apontavam que em 2011 haviam cerca de 1,3 GW de potência heliotérmica instalada no mundo, e mais de 2,3 GW em construção naquele mesmo ano (EPE, 2012). No Brasil, segundo estudo realizado por Giz (2015), aponta que 1,8 GW em geração por CSP, seriam economicamente viáveis para sua instalação.

O processo heliotérmico tem início com a reflexão dos raios solares diretos, utilizando um sistema de espelhos, chamados de coletores ou heliostátos, onde o coletor capta a radiação solar, a converte em calor, e transfere esse calor para um fluido (água, ar ou óleo em geral) (KALOGIROU,

2009), os coletores podem acompanhar a posição do Sol ao longo do dia, para que com isso reflitam os raios solares para um foco onde se encontra um receptor (ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2014).

Segundo o EPE (Empresa de Pesquisas Energéticas), as principais configurações de usinas termossolares são os concentradores – parabólicos, conhecidos como calhas; os concentradores Fresnel; os concentradores de prato parabólico; e os arranjos heliostáticos. Esses modelos serão explanados ao longo do trabalho.

Estudo apresentado por INPE (2006), através do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006), o qual divulgou um mapa com a radiação direta anual no Brasil, mostrando que os maiores valores observados estão no vale do Rio São Francisco, na Bahia e na divisa entre os estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná. Isso leva a crer que aliando políticas de incentivos, fomentação acadêmica e investimentos, podem fazer do Brasil uma potência no que abrange a geração de energia por fontes heliotérmicas.

1.2 PROBLEMA E PREMISSA

Nos últimos anos, o Brasil vem enfrentando uma grave crise energética, que ocorre principalmente pela falta de chuvas e pelo fato de que a maioria do potencial energético do país estar concentrado nas usinas hidrelétricas. Por esta razão, a cada ano que se passa, o tema de eficiência energética e novas fontes de energia estão cada vez mais em pauta. Infelizmente o país ficou refém das fontes termoelétricas, que representam uma energia cara e muito degradante ao meio ambiente, sem falar que é uma forma de geração com recursos finitos (MME, 2015). Com isso, é necessário pensar em novas alternativas para a geração de energia elétrica no Brasil.

Nesse sentido, a fonte de energia heliotérmica, que vem sendo estudada e pesquisada em todo mundo, surge como uma das alternativas para o Brasil, bem como para o planeta.

O Brasil é um país com rico potencial visto sua a grande possibilidade de se obter radiação solar direta durante o ano todo, em especial a região do

Nordeste brasileiro e nas regiões de São Paulo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Paraná, de acordo com INPE (2006).

Uma das dificuldades para o crescimento das usinas heliotérmicas no país, é a falta de pessoas capacitadas especificamente para planejar, construir e operar as usinas, pois até agora não existem formações específicas e formais para a área de helioterma. Outra dificuldade é o fato de não existir uma regulamentação nacional, que visa criar normas para integração à rede nacional, taxaço de equipamentos importados e programas de fomentos.

1.3 OBJETIVO

1.3.1 Objetivo Geral

Pesquisar e mostrar as diferentes tecnologias de geraço de energia existentes através do processo heliotérmico, bem como analisar o potencial e a viabilidade de implementaçao dessa fonte para o mercado energético brasileiro.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Entender o funcionamento da geraço de energia por fonte heliotérmica;
- Pesquisar os diferentes processos de geraço utilizando fontes heliotérmicas;
- Verificar as diferentes maneiras e configuraçoes para implementaçao da fontes heliotérmica;
- Identificar regiões com potenciais de se construir um pólo energético de fontes heliotérmicas no país.

1.4 JUSTIFICATIVA

A energia heliotérmica é uma fonte de energia que vêm ganhando espaço no mundo, porém no Brasil, existem poucas pesquisas científicas que

possam dar suporte e nortear o surgimento dessa fonte energética em nosso país, tecnologia essa que é uma grande aposta mundial na área de fontes alternativas de energia elétrica.

Justifica-se a relevância de se realizar esse estudo, pois se trata de uma pesquisa nova dentro da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e também considerando que existem poucas fontes para pesquisa dentro desse tema no país, causa essa que indiretamente pode atrasar a criação de um pólo heliotérmico no Brasil.

Justifica-se também para divulgá-lo em eventos e publicações científicas como contribuição para outros trabalhos científicos a fim de contribuir com o desenvolvimento científico na área.

1.5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Para o desenvolvimento do trabalho foram realizadas etapas metodológicas, no intuito de analisar todo o tipo de pesquisas já publicadas sobre o tema, buscar fontes e conteúdos confiáveis que possibilitem a concretização de um amplo estudo sobre o tema.

Primeiramente foram levantadas fontes e trabalhos que possam dar suporte científico para compreensão do funcionamento das fontes heliotérmicas, fontes e trabalhos esses que em sua grande maioria são de origem da língua inglesa ou alemã e diante disso demandaram tempo para traduções.

Também, fez parte do procedimento metodológico a captação de estudos, que mostrou a geografia brasileira, a fim de conhecer as regiões geográficas que melhor possuem níveis de irradiação solar, a fim de se analisar a viabilidade de implementação de fontes heliotérmicas no Brasil.

A partir desse momento, com os devidos estudos, começará a se solidificar o trabalho, a fim de mostrar a capacidade do Brasil em desenvolver fontes heliotérmicas.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1 – Introdução: abordagem do tema, justificativa, objetivos do trabalho e procedimentos metodológicos.

Capítulo 2 – Revisão Teórica: realizar um estudo teórico aprofundado sobre energia heliotérmica, buscando trazer os aspectos de funcionamento e a viabilidade de implementação das fontes heliotérmicas.

Capítulo 3 – Procedimentos metodológicos: descrição dos procedimentos para realização do estudo.

Capítulo 4 – Resultados: apresentação e análise dos estudos com base nas referências teóricas.

Capítulo 5 – Considerações Finais: avaliação dos resultados, considerando seus objetivos e sugestões para futuros trabalhos.

Referências

2 A ENERGIA SOLAR

O uso do sol como fonte de energia há algum tempo deixou de ser apenas um futuro promissor, hoje em dia já é uma realidade e tem um potencial ainda muito grande para suprir a crescente demanda energética em todo o planeta. Ao passo que as energias derivadas do petróleo ficam constantemente mais caras e escassas, pois são riquezas finitas, as tecnologias para geração de energia a partir do sol ganham muito mais notoriedade (ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2014).

A energia solar é considerada a forma de energia mais antiga utilizada pelo homem, que vem sendo usada desde o princípio da civilização, primeiramente para secagem e preservação de alimentos (LODI, 2011). Considerada uma fonte de energia inesgotável e que pode ser usada para suprir as necessidades da sociedade, sejam para geração de energia elétrica ou para aquecimento.

De acordo com Kalogirou (2009) citado por Lodi (2011), durante o século XVIII, foram desenvolvidos na Europa e no Oriente médio, fornalhas solares para derreter metais. Ainda no mesmo século, o químico Lavoisier desenvolveu uma fornalha solar que atingiu temperaturas na casa de 1.750 °C, utilizando lentes de 1,32 m (KALOGIROU, 2009).

Já no século seguinte, foram realizadas diversas tentativas para se converter a energia solar térmica oriunda da radiação solar, em vapor de baixa pressão, para que se pudessem operar máquinas a vapor. Contudo somente no final do século, foi desenvolvido, nos Estados Unidos da América, o primeiro motor a vapor que trabalhava diretamente com a energia solar, era um sistema que continha cilindros parabólicos que usavam água e ar como fluido de trabalho (KALOGIROU, 2009 apud LODI, 2011).

O século XX deu continuidade no desenvolvimento da tecnologia do uso de energia solar, no início do século foi construído no Egito, um campo solar que ocupava cerca de 1.200 m². Era composta por cilindros parabólicos, onde se aquecia a água até virar vapor diretamente nos receptores, que tinha como finalidade a operação de uma bomba, para bombeamento de água do rio Nilo (MALAGUETA, 2012).

A produção total de energia solar é $3,8 \times 10^{20}$ MW, equivalente a 63 MW por metro quadrado da superfície do Sol. Essa energia é irradiada em todas as direções e a Terra recebe apenas uma pequena parte da total emitida. A densidade média anual do fluxo energético proveniente dessa radiação solar, quando é medida em um plano perpendicular à direção da propagação dos raios solares no topo da atmosfera terrestre, denomina-se “constante solar” e equivale ao valor de 1.367 W/m^2 (FILHO, 2014).

Sabe-se que o raio médio da Terra é 6.371 km e sendo o valor da irradiância 1.367 W/m^2 incidido sobre a área projetada da Terra, conclui-se que a fração da potência total disponibilizada pelo Sol que incide na atmosfera da Terra é de aproximadamente 174.000 TW. Esses dados equivalem que se em 84 minutos de radiação solar incidido na Terra é igual ao consumo de energia elétrica mundial durante um ano (FILHO, 2014).

Os termos empregados sobre energia solar na literatura apresenta muitas variações para designar grandezas solarimétricas. Denominações como irradiação, radiação, insolação e irradiância são usadas com fins diversos e até mesmo usadas para utilizar grandezas distintas em muitos trabalhos (VIANA, 2010).

De acordo com a ABNT NBR 10898 – Energia Solar Fotovoltaica – Terminologia, citado por Viana (2010), a qual define os termos relativos à conversão fotovoltaica de energia, terminologia e unidades padronizadas no Brasil, nesta área, para as grandezas solarimétricas. A fim de padronização, será utilizada nesse trabalho, a denominação “radiação solar”, a energia oriunda do Sol e serão adotadas as seguintes definições:

- Irradiância solar (G) – Taxa na qual a radiação incide na superfície, por unidade de área dessa superfície, medida em watt por metro quadrado (W/m^2);
- Irradiância global (GHOR) – Potência radiante solar, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, que é igual à irradiância direta mais a irradiância difusa;
- Irradiância direta (GDIR) – Irradiância solar incidente em uma superfície, sem ter sido espalhada pela atmosfera, podendo ser horizontal (GDIR) ou normal (GDIRN);

- Irradiância difusa (GDIF) – Potência radiante do céu, recebida em uma unidade de área em uma superfície horizontal, excluída a irradiância direta;
- Irradiância total (GTOT) – potência radiante solar total com os componentes direta, difusa e de albedo, recebida em uma unidade de área em uma superfície com inclinação qualquer;
- Albedo – índice relativo à fração da energia solar, recebida em uma unidade de área, devida à refletância dos arredores e do solo onde está instalado um dispositivo.

Ainda segundo Viana (2011) a irradiação é igual à integral da irradiância (kW/m^2) e representa energia por unidade de área incidente em uma superfície (kWh/m^2) no período considerado e graficamente, a irradiação corresponde à área sob a curva da irradiação ao longo do tempo.

As definições relativas à irradiação, conforme a NBR 10898, apresentadas por Viana (2011):

- Irradiação solar (H) – irradiância solar integrada durante um dia, medida em watt hora por metro quadrado (Wh/m^2);
- Irradiação global (HHOR) – irradiância global integrada durante um dia;
- Irradiação difusa (HDIF) – irradiância difusa integrada durante um dia;
- Irradiância devido ao albedo (GALB) – irradiância refletida;
- Irradiação total (HTOT) – irradiância total integrada durante um dia;
- Irradiação direta (HDIR) – irradiância direta integrada durante um dia, podendo ser horizontal (HDIR) ou normal.

A irradiância solar que chega a superfície da Terra varia rapidamente em função da distância entre a Terra e o Sol e da atividade das manchas solares. Essa irradiância possui um valor médio denominado constante solar (GSC), definido como a taxa de radiação solar, em todos os comprimentos de onda, incidente em uma superfície localizada fora da atmosfera terrestre, sendo perpendicular à radiação solar, a uma distância de $1u_a$ do Sol, sendo u_a a unidade astronômica equivalente à distância média do Sol a Terra, 149.597.870 km (VIANA, 2010).

Segundo Santos (2014), o valor da constante solar, de acordo com a definição, é independente da distância do Sol a Terra, mas o seu valor varia entre 1.365 e 1.367 W/m² em função da atividade das manchas solares, sendo adotado o valor médio GSC = 1.366 W/M².

A radiação solar ao entrar na atmosfera terrestre sofre diversos processos físicos e chega à superfície terrestre composta de duas parcelas, radiação direta e radiação difusa, além da irradiação devido ao albedo, conforme é mostrado na Figura 1.

A radiação total que é incidente sobre uma superfície inclinada, inclui as componentes direta, difusa e mais uma parcela devida à radiação refletida na superfície e nos elementos do entorno, que é a função do albedo do local (VIANA, 2010).

Atualmente, com as tecnologias existentes, existem duas maneiras de gerar energia elétrica a partir da energia solar, a fotovoltaica e a heliotérmica. A energia fotovoltaica consiste na obtenção direta de energia elétrica a partir energia solar, quando fótons provenientes da radiação solar incidem sobre um material semicondutor, normalmente o silício e utiliza como recurso a radiação global (inclui radiação direta e difusa). Também a heliotérmica, que é tema de estudo do presente trabalho (CASTRO, 2015).

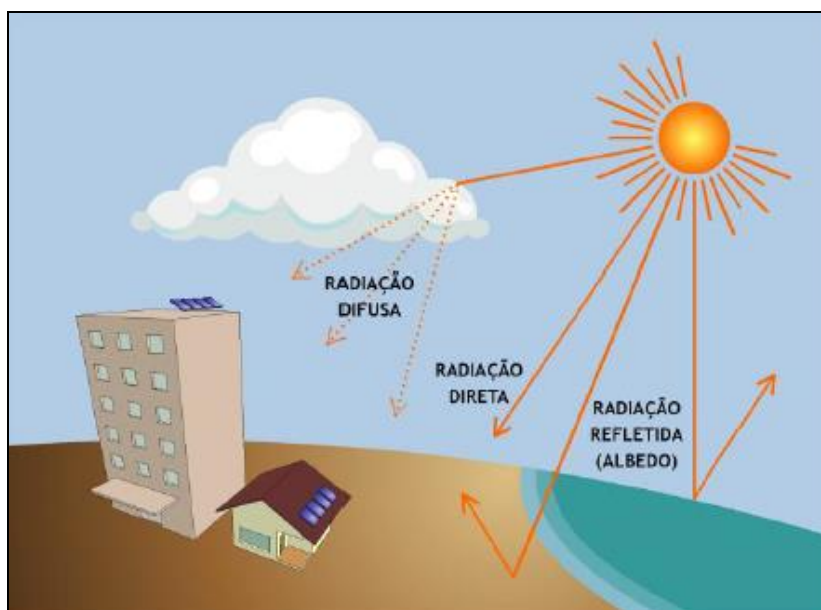


Figura 1: Componentes da radiação solar: direta, difusa e devido ao albedo.
 Fonte: VIANA, 2010

A radiação direta, incidente sobre uma superfície fixa no solo, terá intensidade variável, devido à trajetória do Sol ao longo do dia e durante o ano, sendo que em apenas duas vezes no ano, em um único horário, a radiação incidirá perpendicularmente à referida superfície fixa (VIANA, 2010).

A única componente de radiação solar que pode ser concentrada é a irradiância direta normal, também conhecida por DNI, logo será a componente que mais se dará evidência quando o assunto for energia heliotérmica. Essa componente pode ser medida através da irradiância global e irradiância difusa ou através de um pireliômetro acoplado a um rastreador solar (PORFIRIO, 2013).

Considerando a radiação solar que chega à superfície da Terra e incide sobre uma unidade coletora, que poderia ser uma planta heliotérmica, tem-se que essa radiação é constituída por duas componentes, a componente direta e a componente difusa. A radiação direta é a que provém diretamente da direção do Sol, já a difusa é proveniente de todas as direções e que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre (FILHO, 2014).

Mesmo num 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 (FILHO, 2014).

3 TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO HELIOTÉRMICA

A geração de eletricidade a partir do Sol pode ser realizada de forma indireta e de forma direta. Sendo que a indireta converte-se a energia solar em energia térmica, para em seguida converter em energia elétrica. Já a forma direta utiliza-se o sistema fotovoltaico (VIANA, 2010).

Das tecnologias existentes para usar o sol como fonte de energia elétrica, as fontes fotovoltaicas são as mais comuns hoje em dia, porém as fontes heliotérmicas vêm ganhando espaço em vários países ao redor do mundo. A principal diferença entre energia fotovoltaica e energia heliotérmica é que o sistema fotovoltaico consiste em utilizar a luz solar direta, ou seja, o céu sem nuvens e baixa umidade, por conta da necessidade de concentrar os raios solares para gerar eletricidade. Já o sistema heliotérmico, como será visto no presente trabalho, consiste basicamente em utilizar a energia do sol para gerar vapor d'água, para logo gerar energia elétrica através de uma turbina ou de um motor (ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2014).

O histórico de fontes heliotérmicas é recente no mundo. Por volta da década de 1970 houve a primeira grande crise de abastecimento do petróleo, o que de certa maneira elevou o incentivo e a procura por fontes alternativas para geração de energia elétrica. Em decorrência disso, a primeira planta solar comercial foi instalada no Novo México em 1979, composta por coletores cilindros parabólicos e utilizada para calor de processos industriais (MALAGUETA, 2012).

Já em 1982, foram desenvolvidos os primeiros coletores solares cilindros parabólicos, o qual foi a primeira fonte heliotérmica comercial para geração de eletricidade no mundo, chamada de SEGS 1, instalada na Califórnia – EUA, com capacidade de geração de 14 MW de potência (LODI, 2011).

Nesse sentido, esse capítulo visa apresentar a tecnologia CSP (Concentrated Solar Power), fazendo-se entender que já é uma tecnologia madura e muito promissora em todo o mundo, sendo uma opção sólida para a diversificação da geração de energia elétrica.

Os países pioneiros na tecnologia de fontes heliotérmicas são a Espanha, o EUA, a África do Sul e a Índia (GIZ, 2014), e através da Figura 2 pode-se notar com maior que realmente que esses países são os que obtêm a maior capacidade instalada de geração de fontes heliotérmicas, a Figura 2 também já apresenta um crescimento de 44% da tecnologia CSP, em um comparativo entre os anos de 2007 e 2012. Já a Figura 3 mostra a capacidade instalada em (MW) por países

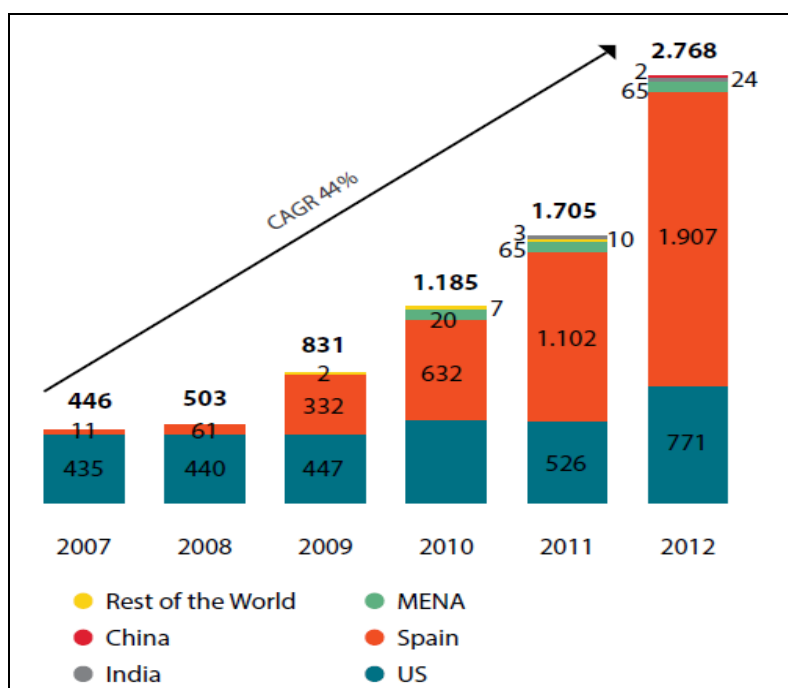


Figura 2: Capacidade instalada (MW) em nível global 2007-2012
 Fonte: SBC, (2013)

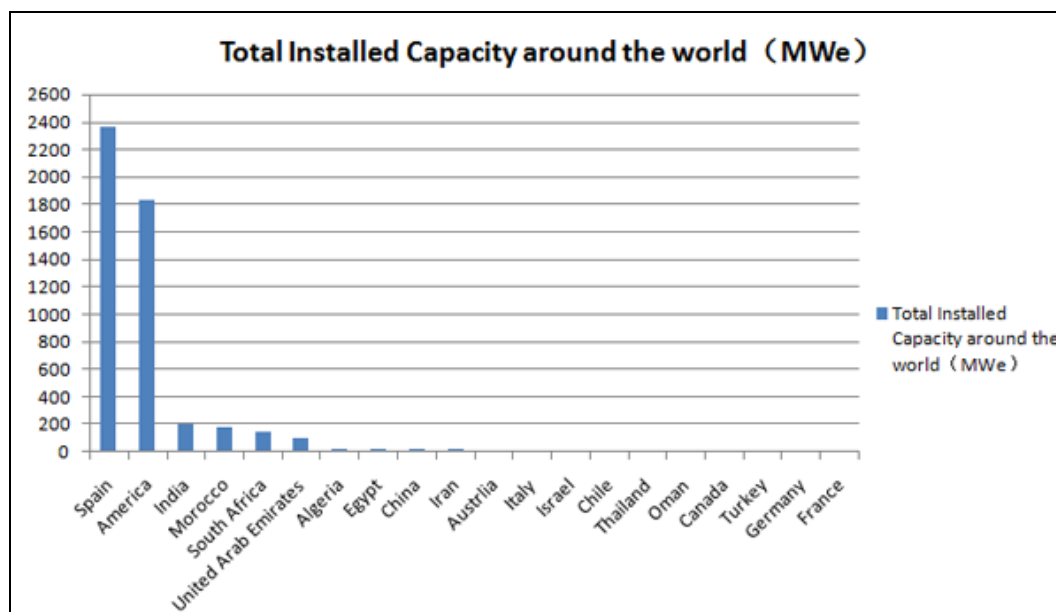


Figura 3: Total da capacidade instalada por países
Fonte: CSPPLAZA, (2016)

O processo de geração através de fontes heliotérmicas é relativamente simples, pode-se até ser comparado com a geração termoelétrica convencional, com a diferença que o calor não é obtido a partir da combustão de um material, e sim de concentração de raios solares. Como será mostrado adiante no trabalho, o vapor gerado através da troca de calor do fluido com a água, movimenta uma turbina e aciona um gerador, ou seja, basicamente o mesmo processo das fontes termoelétricas, sendo a única diferença que nas termoelétricas o vapor gerado provém da queima de combustíveis fósseis, já na heliotérmica é obtido indiretamente através da concentração de energia solar.

Hoje, já se pode dizer que é uma tecnologia madura a nível global, pois segundo REN21 (2015), no ano de 2013, as fontes heliotérmicas alcançaram uma capacidade instalada a nível global de 3,4 GW de potência e mais 14,5 GW em vários processos de desenvolvimento, em todo o mundo.

Contudo, de acordo com estatísticas apresentadas por CSPPLAZA (2016), a capacidade CSP mundial instalada alcançou um acréscimo estável em 2015, aumentando 421,1 MW em relação ao ano de 2014, chegando 4.940,1 MW de capacidade instalada globalmente.

As tecnologias heliotérmicas, internacionalmente conhecidas como CSP, geram calor entre 250 °C e 1.500 °C, utilizando espelhos para concentrar

irradiação direta normal do sol. Esse calor pode ser aproveitado diretamente em processos térmicos, armazenado, ou transformado em eletricidade em um ciclo de potência (ANEEL, 2015).

As usinas CSP podem continuar gerando energia mesmo quando nuvens bloqueiam o sol ou depois do pôr do sol (IEA, 2010), ou seja, conseguem armazenar calor e a partir disso são capazes de gerar eletricidade.

A capacidade de armazenamento de usinas heliotérmicas é medida na unidade de MWh, porém uma maneira mais direta de se indicar a capacidade de armazenamento de uma CSP é pelo número de horas em que a usina consegue gerar energia em sua potência, sem incidência da radiação solar (CASTRO, 2015).

O fator de capacidade das tecnologias CSP, que é a razão entre a energia produzida em um ano e a geração nominal da planta, varia muito de acordo com o tempo de armazenagem e a temperatura de operação, quanto mais elevada à temperatura de funcionamento, maior o desempenho e, por conseguinte menor o custo de armazenamento (SBC, 2013). Observam-se essas considerações na Tabela 2 apresentada, onde se faz o comparativo entre o custo de geração e o fator de capacidade, das tecnologias de torre solar e cilindro parabólico.

Tabela 2 - Fator de capacidade de tecnologias, de acordo com o armazenamento

	Custo Capital	Fator de capacidade
Cilindro parabólico - sem armazenamento	4,600 USD/kW	20% a 25%
Cilindro parabólico - com armazenamento de 6h a 8h	7,100 - 9,800 USD/kW	40% a 53%
Torre Solar com armazenamento de 6h a 7,5h	6,300 - 7,500 USD/kW	40% a 45%
Torre Solar com armazenamento de 12h a 15h	9,000 - 10,500 USD/kW	65% a 80%

Fonte: SBC, 2013; (adaptado pelo autor)

Existem alguns conceitos de usinas heliotérmicas, onde a principal diferença entre elas é o mecanismo de concentração solar. Atualmente

existem quatro principais tipos para a produção de energia, que são basicamente o coletor cilindro parabólico (ou calha parabólica), o coletor Fresnel, o disco parabólico e a torre central (ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2014).

As características de cada modelo das usinas heliotérmicas serão demonstradas adiante no trabalho, porém a Tabela 3 demonstra, de forma resumida, algumas características individuais de cada conceito.

Ainda na Tabela 3, pode-se notar que das quatro tecnologias, todas têm capacidade de geração de até 100 MW de potência, sendo que o conceito do cilindro parabólico é o com maior experiência comercial, e o conceito de disco parabólico, como será mostrado adiante no trabalho, só existem plantas protótipos. Nota-se também que o custo de energia gerada a partir de fontes heliotérmicas tende a diminuir com o passar dos anos, de acordo com os estudos e investimentos que estão sendo feitos ao redor do mundo. As outras características mostradas serão abordadas nos tópicos referentes a cada conceito, adiante no trabalho.

Tabela 3 – Características de cada tecnologia CSP.

	Cilindro Parabólico	Torre	Disco parabólico	Fresnel
Experiência comercial	> 20 anos	> 9 anos	-	> 6 anos
Risco tecnológico	Baixo	Médio	Alto	Médio
Grandeza típica de capacidade de geração	50MW até >100MW	50MW até >100MW	100kW até >100MW	50MW até >100MW
Requerimento de construção	Exigente	Exigente	Moderado	Simples para moderado
Temperatura de operação	300°C - 550°C	260°C - 570°C	750°C	270°C
Eficiência	14 - 16 %	15 - 22 %	24 - 31 %	9 - 11 %
Armazenamento	Sim	Sim	Não	Sim
Custo de energia nivelado (US\$/kWh)	Atual: 0,3-0,75 Futuro: 0,06-0,08	Atual: 0,2-0,90 Futuro: 0,06-0,08	Futuro: 0,05-0,08	Futuro: 0,05-0,08
Uso de água	Alto	Alto	Baixo	Médio
Requerimento de terra	Alto	Alto	Variável/flexível	Baixo

Fonte: Miller e Lumby, 2012; (adaptado pelo autor).

Como foi visto anteriormente, a tecnologia de cilindro parabólico é a mais madura no mundo, e também a mais instalada, conforme é mostrado na Figura 4, que aponta que até dezembro de 2013, haviam em construção, colocação e em operação, 5.298 usinas heliotérmicas, sendo que 4.245 dessas estavam usando a tecnologia de cilindro parabólico, sendo que seus principais projetos estão instalados na Espanha e nos Estados Unidos, que são um dos países pioneiros nesse tipo de geração de energia.

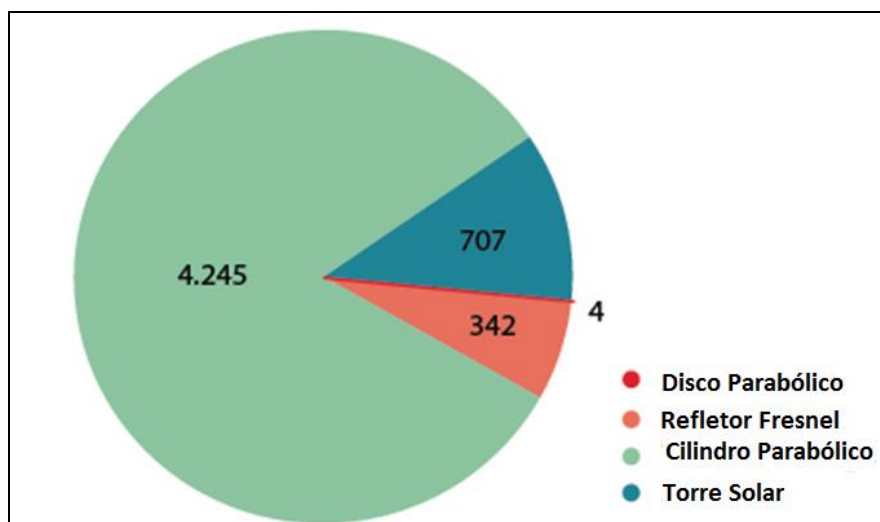


Figura 4: Divisão de tecnologia de projetos CSP

Fonte: GIZ, 2014

As perspectivas futuras com a geração de energia elétrica, oriunda de fontes heliotérmicas, são muito promissoras, de acordo com a SBC (2013), a capacidade instalada a nível mundial deve chegar a 11 GW de potência, até o ano de 2017, como traz a Figura 5, que mostra um crescimento de 31,4% entre os anos de 2012 a 2017. Porém esses números podem sofrer alterações, conforme mostra REN21 (2015), o ano de 2014 fechou a nível mundial com uma capacidade instalada de 4,4 GW de potência, abaixo do número esperado no estudo que SBC (2013) apresentou.

Segundo a IEA (2010), com um apoio e incentivo adequado, no ano de 2050, cerca de 11,3 % de toda a eletricidade gerada no mundo poderiam ser provenientes de usinas heliotérmicas, já um estudo apresentado por GREENPEACE (2013), relata que também no ano de 2050 a capacidade mundial instalada de geração de usinas CSP, possam chegar a 1.500 GW de potência.

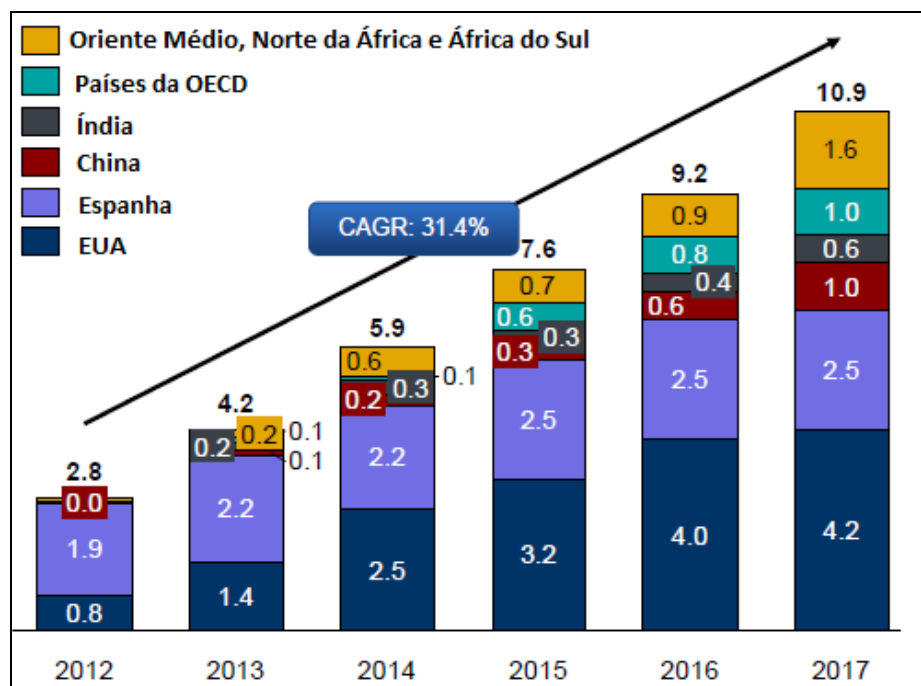


Figura 5: Capacidade instalada de CSP

Fonte: SCB, 2013

Como foi visto anteriormente, existem quatro conceitos diferentes de fontes heliotérmicas, as quais serão citadas nos próximos tópicos, onde serão explanadas separadamente, com seus históricos, suas composições de construção, suas concepções de funcionamento, suas vantagens e desvantagens e também alguns dados relevantes para cada modelo.

3.1 CILINDRO PARABÓLICO

A tecnologia cilindro parabólico, também conhecida como calha parabólica, é a mais testada, comprovada e usada comercialmente dentro do campo de CSP, podendo ser usada para geração de energia elétrica ou para calor de processo. Esse modelo representa 96% dos sistemas instalados no mundo (ANEEL, 2015), o que diante da Figura 4, apresentada por Giz (2014), em um estudo realizado até o final do ano de 2013, pode-se observar que a tecnologia de cilindro parabólico teve ainda mais crescimento até o presente ano, em comparação com os outros tipos de usinas CSP.

A Figura 6 mostra a vista aérea de uma planta CSP, que utiliza a tecnologia calha parabólica, instalada na Espanha, com uma capacidade de geração de 50 MW de potência (GIZ, 2014).

O desenvolvimento do cilindro parabólico ocorreu na Europa, o projeto de geração solar foi elaborado para uma demonstração e foi instalado na Espanha em 1981, e consistiu em dois campos solares de cilindros parabólicos. Somente em 1983, foi construída uma planta, com duas usinas de capacidade de 14 MW e 30 MW (LODI, 2011).



Figura 6: Planta de CSP desenvolvida de calhas parabólicas, na Espanha.
Fonte: GIZ, 2014

Ainda segundo ANEEL (2015), esse conceito consiste de um campo solar e uma unidade central e pode ser equipado com um reservatório térmico. No campo solar, a radiação solar é transformada em energia térmica, para que no processo seguinte essa energia possa aquecer o fluido térmico.

O campo solar é composto de muitas unidades de coletores tipo calha parabólico, arranjados em paralelo (GIZ, 2014). Os coletores calha parabólico são espelhos côncavos, o formato parabólico desses espelhos, focaliza o calor refletido para um tubo absorvedor de calor (ANNEE, 2015), conforme mostra a Figura 8. Geralmente os espelhos são alinhados com até 100 metros de comprimento e a largura de cada um fica entre 5,0 metros e 6,0 metros de comprimento (MALAGUETA, 2012).

Ao longo da linha de foco do refletor parabólico é colocado um tubo metálico preto, coberto por tubo de vidro para evitar as perdas de calor, e que absorve aproximadamente 90% da radiação incidente, denominado receptor. Esse receptor tem uma dimensão de 25 a 150 metros de comprimento. (KALOGIROU, 2009; LODI, 2011).

Por esse tubo passa um fluido de transferência de calor, de alta capacidade térmica, que pode ser óleo, sal fundido, ar ou alguma outra substância que retenha de forma eficaz o calor (ANEEL, 2015). Esse fluido circula em circuito fechado dentro do tubo, sendo o fluido o responsável pelo transporte e armazenamento da energia térmica, o que torna possível a produção de eletricidade em dias nublados ou durante a noite (ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2014). A título de exemplificação a Figura 7 demonstra uma planta onde se pode observar o tubo receptor e a parábola com os espelhos.



Figura 7: Ilustração de uma planta com tecnologia de calha parabólica.
Fonte: MALAGUETA, 2012

Quando a parábola aponta para o Sol, os raios diretos do Sol são refletidos pela superfície do espelho e concentrados no receptor, que nessa tecnologia é o tubo, já mencionado anteriormente (MALAGUETA, 2012). A

radiação concentrada aquece o fluido que circula internamente no tubo (KALOGIROU, 2009).

Com a energia solar absorvida nos tubos, ocorrerá a troca de calor com a água, onde trocadores de calor são usados para gerar um fluxo de vapor.

O fluxo de vapor é levado até a turbina a vapor, fazendo o gerador girar e gerar eletricidade (ANEEL, 2015). O vapor utilizado na turbina pode ser condensado em um sistema de condensação, para que seja bombeado de volta para os trocadores de calor, para que ocorra um processo de reaproveitamento do vapor (LODI, 2011).

Para que possam acompanhar o sentido de deslocamento do Sol ao longo do dia, são construídos com um sistema de rastreamento de um eixo, podendo ser orientados no sentido norte-sul ou no sentido leste-oeste (MALAGUETA, 2012). Esse sistema deve ser confiável para rastrear o Sol durante o dia, inclusive durante dias nublados, e retornar a posição original no fim do dia (KALOGIROU, 2009). Durante o verão o coletor norte-sul coleta mais calor do que o leste-oeste, porém esse último tem uma produção de energia ao longo do ano mais uniforme que o sistema norte-sul (KALOGIROU, 2009).

O sistema de rastreamento também tem a finalidade de proteção, atuando para que haja um desvio do concentrador em relação ao foco em casos como superaquecimento, tempestades de vento ou intempéries e falhas no mecanismo de escoamento do fluido (MALAGUETA, 2012). A Figura 8 apresenta uma ilustração do princípio de funcionamento de uma tecnologia de calha parabólica.

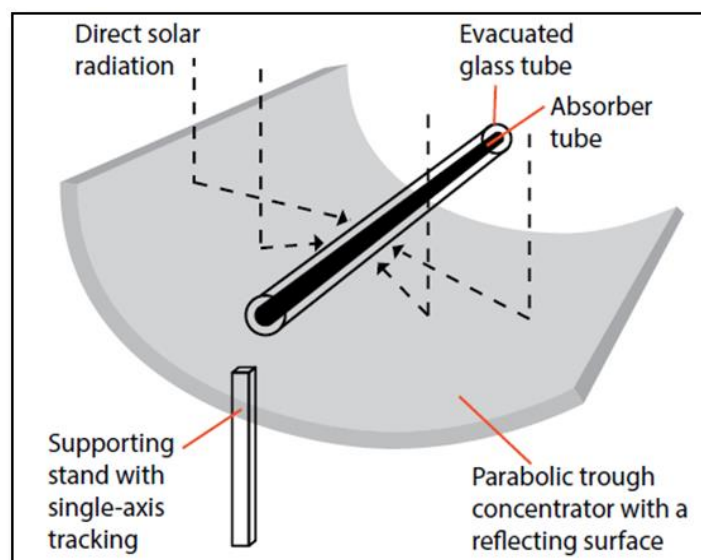


Figura 8: Princípio de uma calha parabólica
Fonte: GIZ, 2014

3.2 REFLETOR LINEAR FRESNEL

A tecnologia de refletores Fresnel, conhecida também com LFR (Linear Fresnel Reflectores) é a que apresenta a maior simplicidade na sua concepção de funcionamento, em relação às outras tecnologias de concentração solar (ANEEL, 2015), sendo essa talvez sua principal vantagem.

Esse sistema tem chamado cada vez mais a atenção no mercado mundial, contudo diferentemente dos outros modelos de CSP, somente a partir da década de 1990 que essa tecnologia entrou na ordem do dia (GIZ, 2014). Sua primeira planta teste entrou em operação no ano de 2003, na Austrália, tendo capacidade de geração de 1,0 MW de potência (GREENPEACE, 2009).

Contudo esse conceito ainda não é uma tecnologia madura, em vista dos cilindros parabólicos, diferentemente dos cilindros parabólicos, que já tem um histórico de funcionamento grande. A maior parte das modelos existentes de LFR são plantas pilotos, dessas plantas, a maior comercial existente, a Kiberlina, instalada no EUA, que tem uma capacidade de geração em torno de 5,0 MW de potência. (ANEEL, 2015 apud KALOGIROU, 2009).

A forma de desenvolvimento do refletor linear Fresnel se aproxima do sistema cilindro parabólico, porém utiliza espelhos planos ou levemente curvados que alinhados e segmentados, refletem a radiação solar em um

receptor fixo e linear, com a face voltada para baixo (LODI, 2011), como aponta a Figura 9. Sua tecnologia pode operar com temperatura na ordem de 450 °C (ANEEL, 2015).

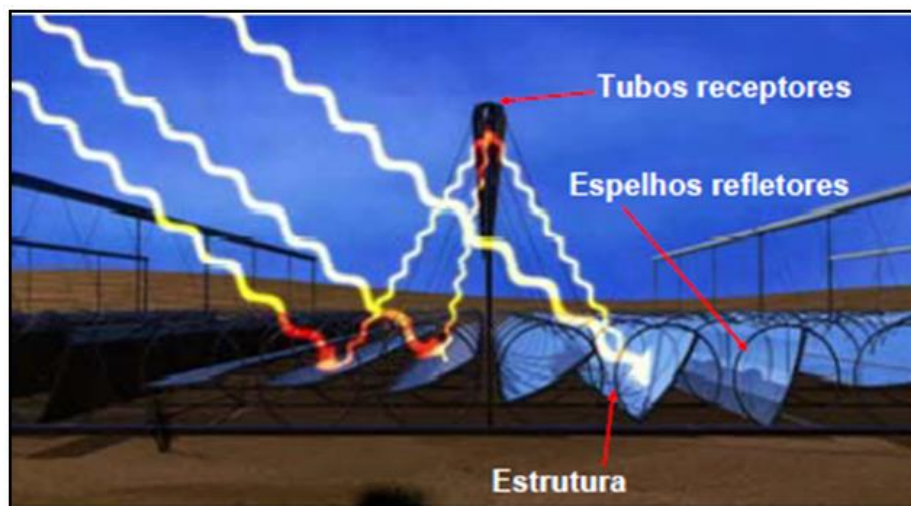


Figura 9: Desenho esquemático do refletor Fresnel
Fonte: LODI, 2011

Segundo Lodi (2011), o princípio básico dessa tecnologia, é a utilização de dois receptores em paralelos para cada linha de espelhos, instalados em uma cavidade trapezoidal. Logo, sua área de implementação, em comparação com a tecnologia dos cilindros parabólicos é bem menor, sendo essa outra vantagem.

Outras diferenciações do modelo de refletor Fresnel para o de cilindro parabólico, é que nessa tecnologia não há a necessidade do uso de óleo térmico como fluido, pois a geração de vapor se dá diretamente no receptor, onde circula água como fluido de trabalho.

Como a geração de vapor se dá diretamente no receptor, não há utilização de trocadores de calor para geração de vapor. Assim seu custo de investimento reduz consideravelmente.

Um cuidado que se deve tomar na execução do projeto, é que um espelho não faça sombra em outro espelho, pois esse detalhe pode acabar fazendo com que a área a ser oca seja maior (KALOGIROU, 2009).

Já uma desvantagem desse sistema é ter uma eficiência óptica menor por área de refletor, principalmente devido à interferência entre segmentos refletores individuais (GIZ, 2014).

As fontes heliotérmicas do tipo Fresnel, podem ser usadas para além da geração direta de energia elétrica, como produção de vapor extra, servindo de backup para usinas de carvão e gás natural, assim como em indústrias com alta demanda de calor de processo (ANEEL, 2015).

3.3 TORRE SOLAR

Também conhecida como Central Receiver System (CRS), essa tecnologia utiliza espelhos de grande porte, chamados de heliostatos, que ficam instalados no solo, para fim de refletir a luz solar em um receptor central instalado no topo de uma torre (LODI, 2011). A torre possui receptor central fixo e foco pontual com rastreamento solar em dois eixos (ANEEL, 2015).

Cada heliostato é composto por quatro espelhos instalados no mesmo pilar, com área refletora total de 50 m² a 150 m² (KALOGIROU, 2009), cada heliostato rastreia o sol individualmente e concentram a radiação no receptor. A Figura 10 demonstra como se dá a instalação de uma planta de usina CSP usando a tecnologia de Torre Solar.

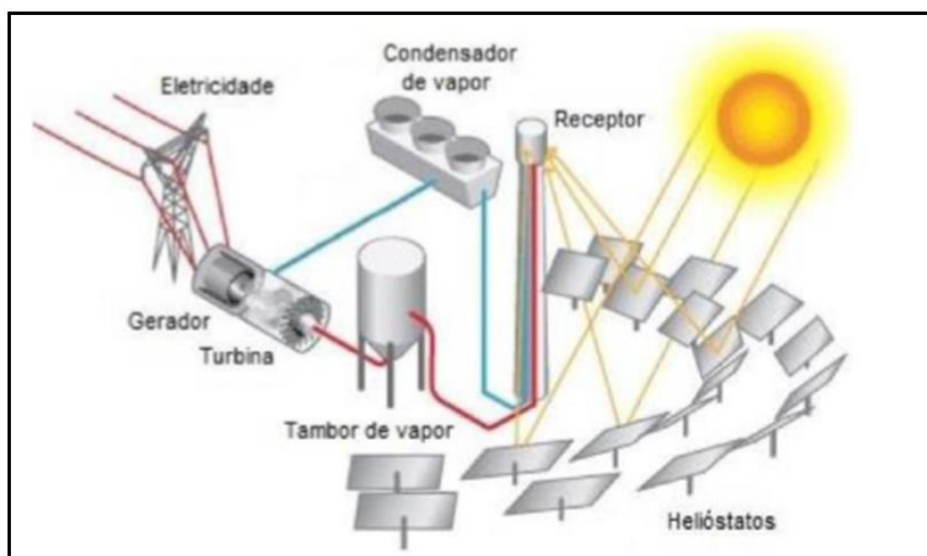


Figura 10: Esquema de instalação e funcionamento de uma Torre Solar
 Fonte: ANEEL, 2015

Seu funcionamento se dá através de um fluido que circula pelo receptor, absorvendo a energia solar que foi concentrada, convertendo a energia solar em energia térmica, para depois ser convertido em vapor superaquecido, que será utilizado em uma turbina a vapor (ANEEL, 2015; LODI, 2011).

O fluido de transferência de calor pode ser sal fundido, ar (fluidos ditos primários), nesse caso pode alcançar temperaturas na ordem de 595 °C ou a própria água para geração direta de vapor, que pode chegar a uma temperatura de 390 °C (LODI, 2011).

A Figura 11 traz a vista aérea de uma usina CSP que utiliza a tecnologia de torre solar, essa usina instalada na Espanha conta com 624 heliostatos instalados, sendo a maior do mundo com essa tecnologia.



Figura 11: Planta CSP Torre Solar, instalada na Espanha, contando com 624 heliostatos. Fonte: GIZ, 2014

As temperaturas alcançadas nesse tipo de sistema podem chegar a 1000 °C no receptor, isso permite utilização de turbinas de alta potência, com maior eficiência de conversão de energia mecânica na turbina para energia elétrica no gerador (LODI, 2011; ANEEL, 2015).

Ainda segundo ANEEL (2015), devido a sua alta capacidade de armazenar temperatura, essa tecnologia tem o potencial de atingir maior eficiência e um custo menor em relação ao modelo de calha parabólica. Como foi mostrado anteriormente na Tabela 3.

3.4 DISCO PARABÓLICO

O sistema de disco parabólico, também conhecido como prato parabólico, utiliza um grande prato parabólico reflexivo que concentra toda a luz solar, que atinge o disco em um foco pontual, onde o receptor capta o calor e faz a devida transformação. Sua grande vantagem é que pode atingir grandes temperaturas, devido a maiores concentrações de energia solar (GIZ, 2014).

A tecnologia heliotérmica de disco parabólico é uma unidade autônoma de geração, composta pelo coletor, que são espelhos parabólicos

independentes, com tamanho típico de 5 m a 15 m de diâmetro, um receptor e um motor Stirling (ou uma micro turbina), que se conecta a um alternador. Esse modelo é caracterizado por discos com formatos parabólicos que refletem a luz solar em um ponto focal, ou seja, um concentrador de foco pontual (LODI, 2011; ANEEL, 2015; MALAGUETA, 2012).

O processo se dá com o disco rastreando a luz do sol, esse rastreamento se dá em dois eixos, assim sendo capaz de apontar diretamente para o sol do seu nascer até seu poente, coletando a radiação normal direta para o receptor (MALAGUETA, 2012 apud KALOGIROU, 2009).

Com a energia solar coletada e concentrada, adiante é refletida pelos espelhos em formato de disco, para o receptor, transformando a energia solar em energia térmica. Nesse estado a temperatura no receptor pode atingir até 750 °C (LODI, 2011; ANEEL, 2015; MALAGUETA, 2012).

O calor é transferido para o fluido de trabalho que aciona o motor Stirling, aí então é convertido pelo motor em energia mecânica. Acoplado ao motor, está um gerador de energia elétrica, que converte a energia mecânica em energia elétrica (LODI, 2011).

Conforme foi dito, devido ao coletor está sempre apontando para o sol, esse dispositivo é o mais eficiente entre todas as tecnologias CSP, onde a concentração obtida é da ordem de 1000 a 3000 vezes, podendo alcançar temperaturas de até 1500 °C.

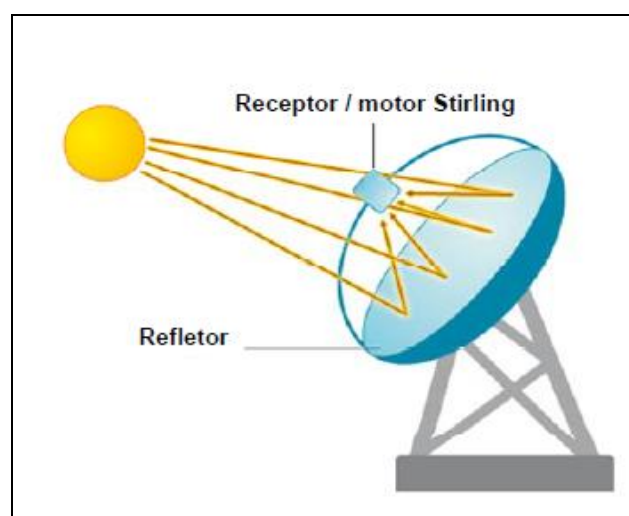
Segundo Lodi (2011) cada módulo do disco pode gerar até 25- kW de potência, podendo ser interligados com vários outros módulos, com isso pode-se obter capacidade de geração elevada (KALOGIROU, 2009).

A Figura 12 mostra uma planta de produção de discos parabólicos, em Rajasthan, na Índia. A planta consiste em 84 receptores, cada refletor atinge temperaturas de foco de até 800 °C e tem capacidade de gerar uma potência de 4 kW (GIZ, 2014), porém é uma planta construída para testes, ou seja, é uma planta protótipo.



**Figura 12: Planta existente na Índia, com 84 receptores.
Fonte: GIZ, 2014**

Já a Figura 13, demonstra o esquemático básico da tecnologia de prato parabólico (GIZ, 2014).



**Figura 13: Desenho esquemático do disco parabólico
Fonte: GIZ, 2014**

Esse sistema é o único que no momento não está disponível para comercialização e ainda requer um desenvolvimento maior para realmente ter sua implementação testada e aprovada para fins comerciais, hoje em dia existem apenas algumas plantas a nível de testes (ANEEL, 2015).

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo buscou-se apresentar o histórico das usinas heliotérmicas, o qual vem se consolidando apenas nas últimas décadas, foram mostrados também os países pioneiros a adotar plantas heliotérmicas, que são a Espanha e os Estados Unidos da América, que contaram com um grande incentivo governamental para tal. Ainda foi visto os quatro conceitos de usinas heliotérmicas (cilindro parabólico, refletor Fresnel, torres solar e disco parabólico) bem como suas características e funcionamento, mostrando que a tecnologia de calha parabólica é a mais madura dentre os conceitos e também a mais instalada.

Diante da explanação para cada modelo, pode-se ter noção do grau de crescimento que a tecnologia de fonte heliotérmica vem tendo nas últimas décadas e a perspectiva de crescimento para os próximos anos, sendo que se espera fechar o ano de 2015 com uma capacidade instalada de 9,2 MW de potência a nível global. Sendo que o principal conceito utilizado é a tecnologia de cilindro parabólico que é a mais testada dentro dos quatro modelos existentes de CSP.

Os custos de implementação ainda são muito elevados, porém com o alto crescimento de instalação e o aprimoramento em estudos que possam seus custos tendem a diminuir com o passar dos anos.

As características mostradas dos quatro conceitos utilizados, vão de encontro ao que está sendo procurado hoje em dia ao redor do mundo, no que diz respeito à geração de energia elétrica através de fontes renováveis. A geração térmica concentrada é uma fonte confiável por mais que seja uma tecnologia recente no que tange suas implementações, é ainda uma fonte que não traz grandes preocupações ambientais, que consegue aliar o desenvolvimento tecnológico junto ao econômico, visa buscar a competitividade frente à geração convencional, segurança energética e aumento da demanda.

4 O POTENCIAL HELIOTÉRMICO NO BRASIL

O Brasil ainda não possui nenhuma usina de energia heliotérmica em operação, porém desde o ano de 2010 o governo brasileiro, através do Ministério das Minas e Energia (MME) e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), busca fomentar o desenvolvimento científico e tecnológico para o aproveitamento de energia solar no Brasil, dentre elas as usinas heliotérmicas.

Segundo a ANEEL (2015) já está em fase de planejamento, desde agosto de 2012 uma planta piloto de geração heliotérmica, no estado de Pernambuco, com um custo estimado de R\$ 23.000.000,00. Nessa planta, a princípio, se dará com um modelo de cilindros parabólicos e com capacidade instalada de 1,0 MW de potência, o que em comparação com os modelos comerciais ao redor do mundo, que partem com 50 MW instalados, é uma planta pequena. Ainda que seja uma planta teste, pode ser o ponta pé inicial para o desenvolvimento da tecnologia heliotérmica em nosso país (ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2014).

O Brasil oferece um extraordinário potencial para implantação de fontes heliotérmicas, por estar localizado em uma região intertropical, com isso conta com regiões que oferecem grandes níveis de irradiação solar direta. Além disso, tem a oportunidade de oferecer uma indústria desenvolvida e pronta para aplicar soluções inovadoras (GIZ, 2014).

A instalação de uma usina heliotérmica conta com duas fases principais, a primeira seria a coleta da irradiação solar, que estariam contemplados os equipamentos que necessariamente precisam ser importados, que seriam os espelhos, os concentradores solar, equipamentos esses que estão todos concentrados em centros de pesquisa no exterior. Já a outra etapa seria a de geração térmica, que é formada por equipamentos como a turbina, pelo sistema de resfriamento, pelas bombas e pela construção civil (ANEEL, 2015) (BRASILENERGIA, 2015).

Essa última etapa a indústria brasileira teria condições, como tecnologia e mão de obra, suficientes para suprir a demanda de instalação de

uma usina heliotérmica no Brasil, o que facilitaria para a integração da cadeia produtiva de usinas heliotérmicas (ANEEL, 2015) (BRASILENERGIA, 2015).

Diante disso, no ano de 2015, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), publicou um edital para contribuir para a criação de uma massa crítica e de uma base tecnológica para o desenvolvimento de projetos e serviços nacionais na área de geração de energia heliotérmica, o que inclui também a construção de uma planta piloto em Petrolina.

De acordo com Lodi (2011) a irradiação solar direta mínima requerida para um projeto de geração de energia elétrica a partir de energia solar concentrada é de 5,5 kWh/m²/d, conhecida como DNI (Direct Normal Irradiance). Esse valor é equivalente a 2.000 kWh/m²/ano. Quanto maior o valor do DNI, mais eficiente será a geração e mais favorável para o custo da geração de energia ser mais barata.

De acordo com a Figura 14, que apresenta o mapa de irradiação solar direta brasileiro, o Brasil possui muitas regiões com valor igual ou superior do que a base estabelecida, acima de 2.000kWh/m²/ano, já mencionada no parágrafo acima. Pode-se notar que a região nordeste, mais precisamente o semi árido do nordeste, é a localização que melhor oferece condições, no que tange a irradiação solar, com valores maiores do que 2.201 kWh/m²/ano de energia solar direta. Porém o sudeste, onde se encontra a maior carga energética brasileira, parte do centro oeste e do sul brasileiro, também tem um potencial que seria propenso a receber uma usina heliotérmica, tendo em vista apenas esse requisito.

Esses dados são comparáveis aos obtidos no Sul da Espanha, por exemplo, onde se encontram a maioria dos projetos heliotérmicos existentes naquele país. Essa região possui uma média anual de irradiação solar direta de 2.100 kWh/m²/ano (LODI, 2011), abaixo dos maiores índices obtidos no Brasil.

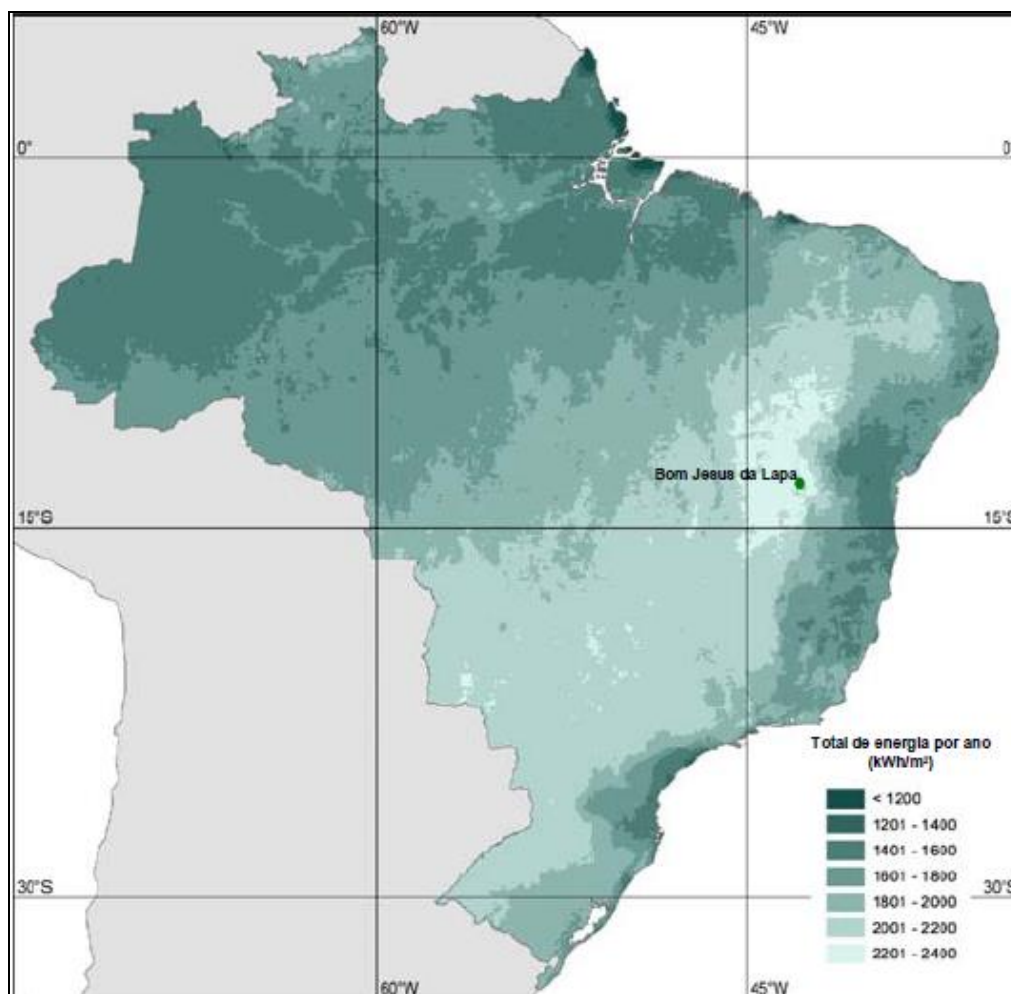


Figura 14: Mapa brasileiro de energia solar direta.
Fonte: INPE, 2006

A Figura 15 mostra o mapa das regiões brasileiras onde a média de radiação solar direta é maior do que 5,0 kWh/m²/dia, ao longo do ano, onde as regiões representadas com amarelo escuro representam áreas com irradiação anual acumulada maior que 2.200 kWh/m².

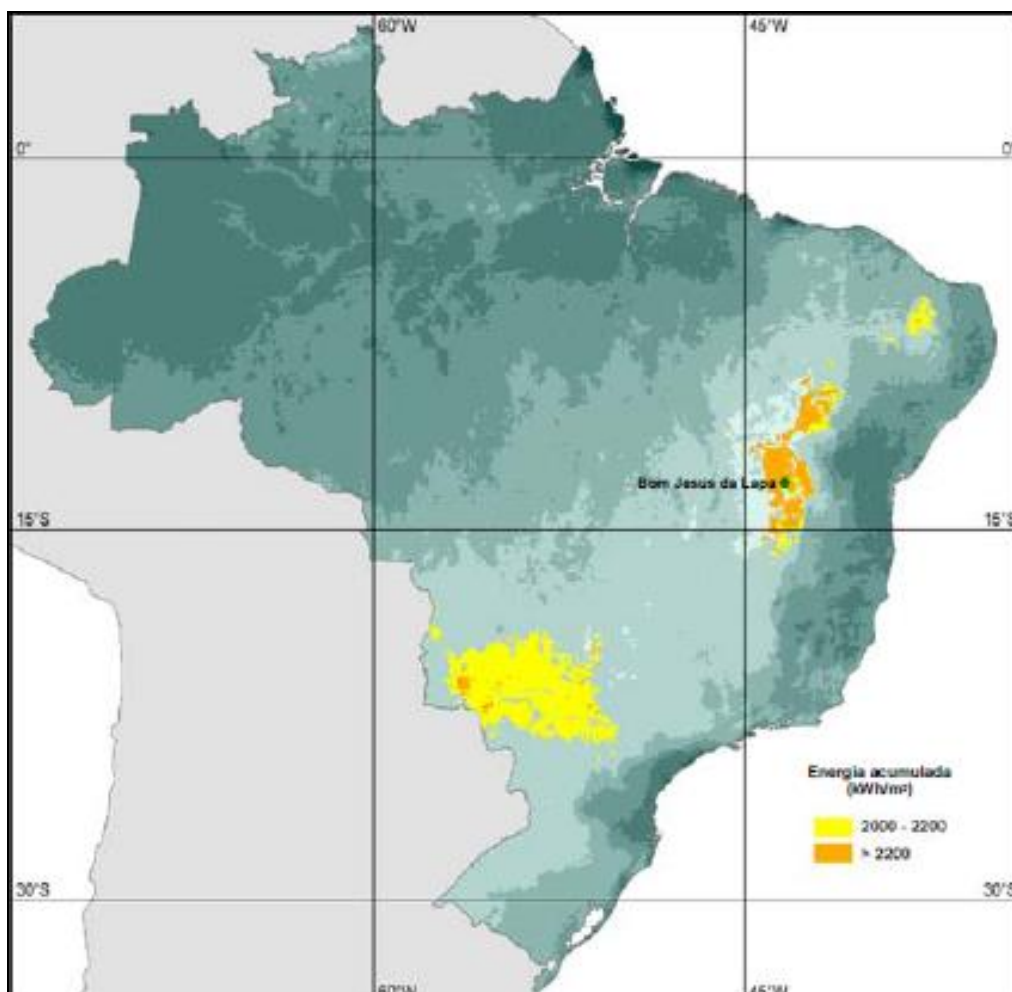


Figura 15: Mapa brasileiro de energia solar direta.
Fonte: INPE, 2006.

Esses dados vão de acordo com estudos que apresentam que as regiões desérticas são as que melhor apresentam condições de implementação desse tipo de tecnologia, por terem clima favorável, com menores atenuações atmosféricas e menores índices de nebulosidade (LODI, 2011).

A região nordeste, onde se obtém os melhores níveis de irradiância solar direta no Brasil, fazendo com que o desenvolvimento de fontes heliotérmicas seja uma opção que permitiria geração de energia com armazenamento integrado, em regiões sem grandes reservatórios de água. Assim como as usinas eólicas estão sendo uma ótima opção para regiões do nordeste brasileiro atualmente.

O fato da região nordeste possuir elevados índices de irradiância solar direta, seja talvez o maior fator, para implementação de uma usina heliotérmica no Brasil, pois ao contrário de muitos países que são dependes de

combustíveis fósseis, para geração de energia elétrica através de usinas térmicas, estão investindo em fontes alternativas, como eólicas e solares, a fim de diminuir a emissão de CO₂ e redução do geração de custo. O Brasil poderia optar por fontes heliotérmicas a fim de diversificar sua matriz energética, majoritariamente oriunda das hidrelétricas e tendo as térmicas em uma crescente muito grande, ou seja, está indo na contramão de países que não querem se manter reféns das termelétricas. Muito embora, como já foi mencionado, fontes alternativas, como as eólicas vem ganhando espaço na matriz energética brasileira..

De acordo com Viana (2010), uma grande área da região sul, no oeste/sudeste dos estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina, apresentam altos índices de HDIRN, na faixa de 2.000 a 2.300 kWh/m²/ano, valores considerados satisfatórios para a implementação de fontes heliotérmicas. Também são regiões caracterizadas por possuírem uma grande concentração de indústrias, ou seja, possuem uma alta demanda energética, essa análise pode ser vista no mapa com o total anual da irradiação direta normal, apresentado na Figura 16.

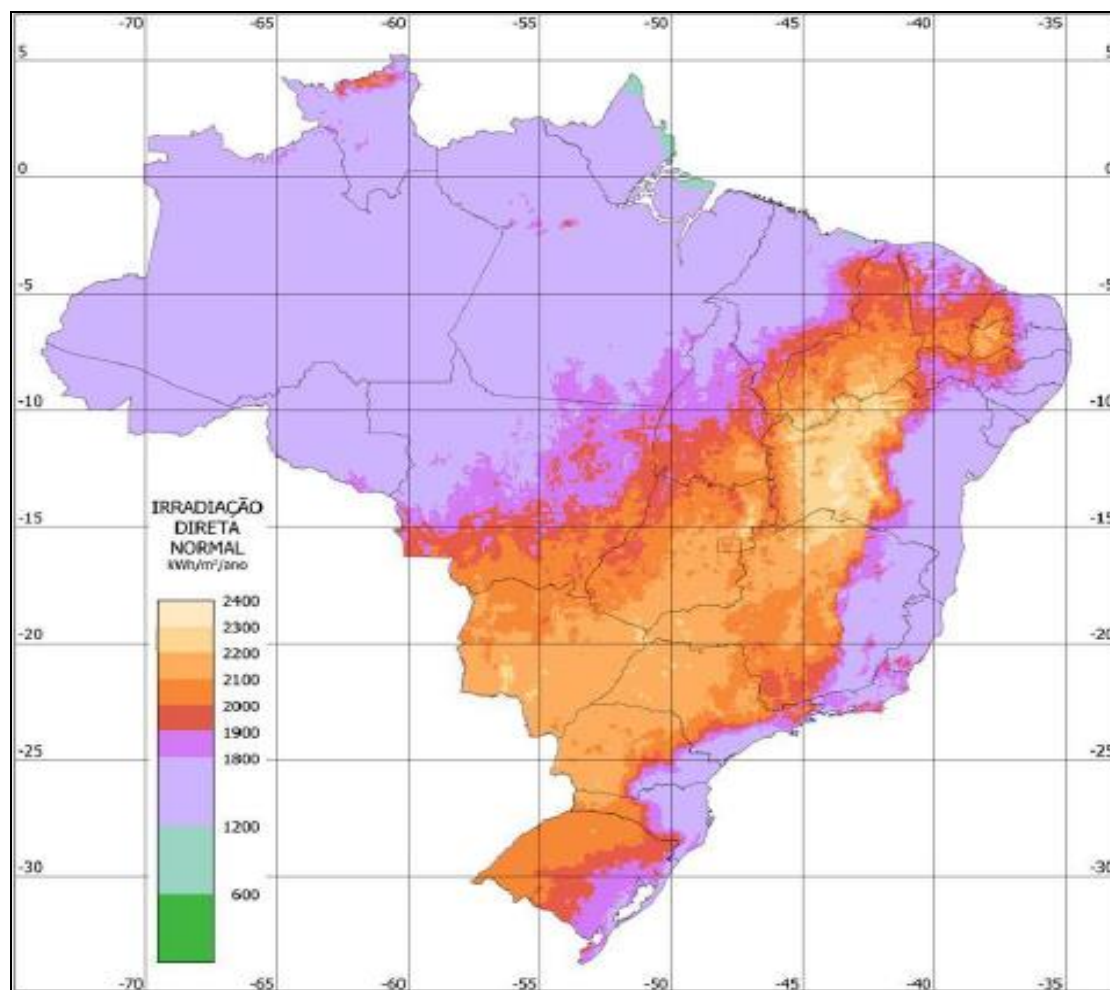


Figura 16: Mapa com o total anual de irradiação direta normal (HDIRN) em kWh/m²/ano, no Brasil.

Fonte: VIANA, 2010.

Uma curiosidade que vale ressaltar, é que o estado de Santa Catarina, é o estado que apresenta na sua região litorânea, os menores índices de irradiação solar direta normal do Brasil, cerca de 1.800 kWh/m²/ano, porém na região oeste do estado, apresenta índices na faixa mais elevada, com até 2.200 kWh/m²/ano (VIANA, 2010).

Levando-se em conta que as fontes heliotérmicas são usinas despacháveis, ou seja, podem controlar parcialmente sua produção para priorizar os momentos em que a demanda é mais alta ou que o sistema mais necessita, não existe no Brasil uma estrutura comercial que incentive a contratação de usinas que forneçam energia nesses momentos, além do mais, o sistema tarifário brasileiro também não cria diferenças de valores entre períodos do dia, de forma que não incentiva usinas despacháveis ou sistema de armazenamento, como é o caso das heliotérmicas ou até mesmo das PCH's

(Pequenas Centrais Hidrelétricas), que também pode controlar sua geração (CASTRO, 2015).

Diante disso, para melhor aproveitamento, redução de custo das usinas heliotérmicas e garantia de suprimento para o sistema interligado nacional, seria interessante o desenvolvimento de formas de contratação que capturem benefícios de acordo com cada fonte e incentivem as configurações mais vantajosas para o sistema (CASTRO, 2015).

Para se compreender melhor o potencial de geração por fontes heliotérmicas no Brasil, Giz (2014), mostra um estudo feito com as tecnologias de cilindro parabólico e torre solar, nas regiões brasileiras. Esse estudo levou em consideração planta sem armazenamento, com armazenamento de 6 horas e 7,5 horas, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4: Potencial de geração no Brasil

	Norte	Nordeste	Sudeste	Centro Oeste	Sul	Total
Cilindro parabólico sem armazenamento						
Potencial [GW]	5,055	151,098	39,357	47,895	103,460	346
Geração de eletricidade [GWh]	9,110	284,696	62,488	79,686	166,780	602,761
Cilindro Parabólico com armazenamento de 6h						
Potencial [GW]	2,305	78,891	15,212	20,566	49,625	166
Geração de eletricidade [GWh]	7,470	269,928	46,044	63,941	150,634	538,016
Torre Solar com armazenamento de 7,5h						
Potencial [GW]	749	42,271	6,375	9,414	26,760	85
Geração de eletricidade [GWh]	2,685	162,503	21,221	31,594	85,897	303,899

Fonte: GIZ, 2014; (adaptado pelo autor).

Em relação aos custos para instalação de usina heliotérmica no Brasil, são poucos os estudos que trazem essa análise, até porque ainda não há nenhuma planta comercial em operação no país. Porém Filho (2014) fez um estudo para obtenção de índices para instalação de uma usina heliotérmica em

uma região, com alto índice de radiação direta normal, em Bom Jesus da Lapa - BA.

Esse estudo teve como simulação uma usina torre solar, e apresentou bons desempenhos, como fator de capacidade e produção anual, atestando que o Brasil possui grandes características climáticas para implementação desse tipo de planta. Porém no que tange aos custos, o estudo mostrou que ainda não é viável. Verificou-se que uma planta com armazenamento de 7,5 horas, obteve o menor custo de 618,8R\$/MWh (utilizando a conversão de USD em 2014), valor esse muito maior do que a médido valor nos Estados Unidos da América, cujo valor gira em torno 340,5 R\$/MWh. Em comparativo com os projetos de energia eólica no Brasil, no ano de 2014, que foram vendidos a 129,97R\$/MWh, também se apresenta um custo elevado (FILHO, 2014).

De acordo com Giz (2014), por conta da estrutura do mercado brasileiro, apenas plantas com armazenamento térmico seria rentável para o mercado brasileiro atual. Logo essa parte da cadeia é essencial para o desenvolvimento futuro das fontes heliotérmicas no Brasil. Pois teria um impacto positivo sobre vários aspectos na região onde as plantas são construídas, como desenvolvimento de tecnologia e benefício sócio econômico. Logo, o sistema de armazenamento é o elemento chave para projetos de CSP no Brasil, para isso o governo tem de dar apoio e incentivos para que empresas locais possam desenvolver para suprir as necessidades brasileiras.

4.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo foi feito um estudo preliminar e uma apresentação inicial das condições que estão levando o Brasil a instalar sua primeira usina de geração heliotérmica, o qual se mostrou um país muito favorável, pois conta com regiões que não tem grandes variações na duração solar do dia, principalmente o semi árido brasileiro.

Contudo, subentende-se que há a necessidade de se investir em tecnologia nacional para desenvolver as partes componentes dessa fonte, com o intuito de não depender apenas das tecnologias estrangeiras, o que poderia elevar o custo da planta a ser implementada.

5 CONCLUSÃO

A conversão de energia térmica em energia elétrica é uma das atuais e promissoras alternativas propostas para diversificar e complementar a matriz de geração de energia elétrica no Brasil.

Atualmente, a matriz energética brasileira é suprida majoritariamente por hidrelétricas e com um grande aumento das fontes térmicas, o que faz os consumidores terem a percepção na sua tarifa de energia elétrica, além de que o aumento de usinas térmicas faz com haja um aumento de emissão de CO₂, fato que é um grande dano ao meio ambiente.

Diante disso, o Brasil vem pensando ano após ano, em diversificar sua matriz energética através de fontes alternativas de energia elétrica. Diversificação essa que já é notada na matriz energética brasileira, com as usinas eólicas, que já representam mais de 6% da energia gerada no Brasil.

Porém outras fontes alternativas de energia, dentre elas, as fontes solares e suas derivações, ainda representam um baixíssimo índice dentro da cadeia energética brasileira. Por mais que, como mostrado no presente trabalho, o Brasil ofereça grande potencial para geração de energia solar, através da fonte solar, o que vai de encontro com o que vem sendo implementado através do mundo.

Dentro das fontes solares, a possibilidade que surge com bastante afinco a nível global, são as fontes heliotérmicas ou CSP (Concentrated Solar Power). Uma fonte alternativa de energia elétrica, que usa o Sol como fonte para concentrar energia térmica e também se mostra (em estudos) com ótimo potencial de geração.

O investimento em fontes de geração solar térmica concentrada vem sendo adotada internacionalmente como alternativa para diversificação de energia elétrica, em países que tem potencial de radiação solar direta, condições climáticas favoráveis e indústria preparada.

As CSP possuem quatro modelos de tecnologias, as cilindro parabólico, a Fresnell, disco parabólico e torre solar. Sendo que a tecnologia de cilindro parabólico é a mais implementada comercialmente a nível global. Porém a tecnologia de disco parabólico é a mais eficiente dentro das quatro

tecnologias, pois é o modelo que consegue trabalhar com maior temperatura, mesmo assim possui apenas plantas não comerciais, necessitando de melhores tecnologias para redução de custos para implementação.

Atualmente, a capacidade mundial instalada de energia heliotérmica é de cerca de 4.940,1 MW de potência. Sendo que os países que mais vem desenvolvendo e investindo em tecnologias heliotérmicas são os EUA, Espanha, Marrocos e África do Sul.

O Brasil atualmente não possui nenhuma planta de fonte heliotérmica instalada, contudo está em processo de implementação uma planta comercial no estado de Pernambuco, que utilizará a tecnologia de cilindro parabólico. Através de vários estudos, pode-se concluir que o Brasil se mostra um país com alta capacidade de armazenar um pólo de usinas heliotérmicas, devido a vários fatores.

Esse grande potencial mostrado é levado em conta com um índice elevado de irradiância solar direta, maior até de que países pioneiros nesse tipo de geração; criação de vários postos de trabalho, não só na construção da planta, mas também nos setores da indústria relacionados a entregar os componentes; desenvolvimento de pesquisas relacionadas através das universidades, buscando o desenvolvimento da tecnologia, adaptada as condições brasileiras.

Contudo atualmente no que se refere a questões de custos, ainda não é viável a implementação de fontes heliotérmicas, sendo que seria necessário incentivos governamentais para que o custo da geração seja mais compatível com o mercado brasileiro, dando suporte para indústria e pesquisa, criando uma tarifação de energia compatível com cada tipo de fonte de geração. Essas ações seriam um começo para que o Brasil possa diversificar sua matriz através de fontes heliotérmicas.

No desenvolvimento desse trabalho as maiores dificuldades encontradas foram relacionados ao levantamento de dados para análise de custo de uma fonte heliotérmica no Brasil, devido ao Brasil não possuir políticas de incentivo a instalação de energia termo solar na matriz energética.

O trabalho realizado conseguiu atender aos objetivos propostos desse estudo, entretanto, tendo em vista que o Brasil ainda não possui nenhuma

planta de CSP, para melhor análise de viabilidade, em termos de custo, seria interessante um estudo especificamente de uma planta em operação.

Para trabalhos futuros, a sugestão é analisar as tarifações de acordo com as fontes de energia elétrica no Brasil, para assim avaliar o custo de geração de cada fonte e o impacto da tarifação sobre elas. Fato esse que pode influenciar na viabilidade em termos de custo para implementação de uma fonte heliotérmica no Brasil.

REFERÊNCIAS

ANEEL, 2015. Projeto estratégico: “**Desenvolvimento da tecnologia nacional de geração heliotérmica de energia elétrica**”. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, 2015.

BRASILENERGIA, 2015. “**A primeira heliotérmica**”. Acesso em: 03/05/2016, disponível em:
<http://brasilenergia.editorabrasilenergia.com/news/renovaveis/solar/2015/02/primeira-heliotermica-449936.html>.

CASTRO, G., 2015. “**Avaliação do valor da energia proveniente de usinas heliotérmicas com armazenamento no âmbito do sistema interligado nacional**”. UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) – Rio de Janeiro – RJ – Brasil.

CSPLAZA, 2016; **Capacidade Instalada Mundial CSP – Relatório CSPPLAZA**. Acesso em 06/05/2016, disponível em:
<http://en.cspplaza.com/global-csp-installed-capacity-increased-to-4940-mw-by-the-end-of-2015.html>.

ENERGIA HELIOTÉRMICA, 2014; **Campo solar**. Acesso em: 26/06/2015, disponível em: <http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/o-que-e-energia-heliotermica>.

EPE, 2012; Nota técnica - **Análise da inserção da geração solar na matriz elétrica brasileira**. Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, Brasília, Brasil.

FILHO, C., 2014. “**Metodologia para Estudo de Implantação de uma Usina Heliotérmica de Receptor Central no Brasil**”. UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) – Rio de Janeiro – RJ – Brasil.

GIZ – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2015. **CSP tools: comparing and applying planning tools for CSP grid integrations in Brazil**. Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ), Berlin, Alemanha.

GIZ – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2014. **Parabolic Trough, State of the art and market overview**. Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ), Berlin, Alemanha.

GREENPEACE, 2009. **Concentrating Solar Power – Global Outlook 09 – Why Renewable Energy is hot**. Amsterdam, Holanda.

IEA – International Energy Agency, 2010. **Technology Roadmap – Concentrated Solar Power**. Paris. França.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), 2006. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos - SP.

KALOGIROU, S. A., 2009. **Solar energy engineering: processes and systems**. 1ª edição, Academic Press, Elsevier, EUA.

LODI, C., 2011. **Perspectivas para a geração de energia elétrica no Brasil utilizando a tecnologia solar térmica concentrada**. Rio de Janeiro, 2011.

MALAGUETA, C. M., 2012. **Geração heliotérmica: princípios e tecnologia**. ELETROBRAS CEPEL. Rio de Janeiro.

MCTI (Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação), 2013. **Estimativas anuais de emissão de efeito estufa no Brasil**. Brasília, Brasil.

MME (Ministério das Minas e Energia), 2016. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro – Fevereiro – 2016**. Brasília, Brasil.

PORFIRIO, A. C., 2013. **“Um método de estimativa de irradiação solar direta normal a partir de imagens de satélite geostacionário: resultados preliminares.”** INPE, São José dos Campos – SP.

REN21 – Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2015. **Renewable 2015 – Global States Report**. Paris – França.

SANTOS, Marcos H. Smith, 2014. **Potencial de energia solar e de geração com sistemas fotovoltaicos conectados à rede de Moçambique**. Tese (mestrado), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ, 2014.

SBC Energy Institute, 2013. **Concentrating Solar Power**. Gravenhage, Holanda.

TN SUSTENTÁVEL; **Energia heliotérmica, mais uma opção entre renováveis**. Acesso em: 25/06/2015, disponível em: <http://www.tnsustentavel.com.br/noticia/9939/energia-heliotermica-mais-uma-opcao-entre-renovaveis>.

VIANA, Trajano de Souza, 2010. **Potencial de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos com concentrador no Brasil**. Tese (doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Brasil.

WINTERGREEN RESEARCH INC, 2014. **Concentrating Solar Power (CSP) Systems: Market Shares, Strategies and Forecasts**, Worldwide, 2014 to 2020ide, 2014 to 2020.