



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**ESTUDO SOBRE A TECNOLOGIA
HELIOTÉRMICA E SUA VIABILIDADE NO
BRASIL**

**Autora: Isabela Martins Maranhão
Orientador: Fábio Alfaia da Cunha**

**Brasília, DF
2014**



ISABELA MARTINS MARANHÃO

**ESTUDO SOBRE A TECNOLOGIA HELIOTÉRMICA E SUA VIABILIDADE
NO BRASIL**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Alfaia da Cunha

**Brasília, DF
2014**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação

Martins Maranhão, Isabela

Estudo sobre a tecnologia heliotérmica e sua viabilidade no Brasil / Isabela Martins Maranhão. Brasília: UnB, 2014. 66 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2014. Orientação: Fábio Alfaia da Cunha

1. Heliotérmica. 2. Irradiação Solar. 3. Termelétrica a Biomassa. Cunha, Fábio Alfaia. II. Estudo sobre a tecnologia heliotérmica e sua viabilidade no Brasil.

CDU Classificação



ESTUDO SOBRE A TECNOLOGIA HELIOTÉRMICA E SUA VIABILIDADE NO BRASIL

Isabela Martins Maranhão

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 27/11/2014 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Dr.: Fábio Alfaia da Cunha, UnB/ FGA
Orientador

Prof.^a. Dra.: Thais Maia Araújo, UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof. Dr.: Augusto César de Mendonça Brasil, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2014

Esse trabalho é dedicado à Palmira Martins e à Ronaldo Martins, que do céu continuam olhando por mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, pai, irmão, namorado, família e amigos por estarem sempre presentes e por me apoiarem em todos os momentos de alegrias e dificuldades durante meus estudos.

Agradeço também ao meu professor orientador, Fábio Alfaia da Cunha, por aceitar meu convite para orientação deste trabalho e por me orientar com atenção, cordialidade e empenho.

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê. (Arthur Schopenhauer)

RESUMO

A tecnologia heliotérmica, ou *Concentrated Solar Power* (CSP), utiliza a energia solar para gerar energia elétrica. Essa tecnologia utiliza superfícies refletoras que concentram a radiação solar em um receptor. Este trabalho visa explicar o funcionamento de uma heliotérmica, apresentar suas vantagens, desvantagens, sistemas de resfriamento, sistemas de armazenamento térmico, custos (LCOE), e determinar um local propício à construção de uma heliotérmica na região Centro-oeste brasileira. A disponibilidade de água e o relevo locais influenciam na escolha do tipo de tecnologia de concentração solar a ser adotada, assim como na escolha do tipo de sistemas de resfriamento. Os sistemas de armazenamento térmico permitem que a heliotérmica produza energia em períodos que não há luz solar e permite despacho mais constante de energia na rede elétrica. O tipo de arranjo físico da usina heliotérmica influencia no custo de produção (LCOE). Uma heliotérmica operando em paralelo com uma termelétrica a biomassa permite que haja uso compartilhado do conjunto turbina-gerador e dos sistemas de resfriamento, diminuindo os custos operacionais, de instalação e manutenção da heliotérmica. A heliotérmica pode gerar energia para a termelétrica a biomassa nas épocas de baixa moagem de cana-de-açúcar, período em que a termelétrica não funciona. A termelétrica a biomassa pode gerar energia durante a noite e a heliotérmica durante o dia, dispensando o uso de sistemas de armazenamento térmico.

Palavras-chave: Heliotérmica. Irradiação Solar. Termelétrica a Biomassa. Sistemas de Armazenamento Térmico. Sistemas de Resfriamento.

ABSTRACT

The Concentrated Solar Power (CSP) technology uses solar energy to generate electric power. This technology uses reflective surfaces that concentrate solar radiation in a receptor. This work aims to explain how a CSP plant works, presenting its advantages, disadvantages, cooling systems, storage systems, costs (LCOE) and determine a conducive site for CSP construction in Brazilian's Centro-oeste region. Water availability and land relief influence directly on the type of solar concentration technology to be adopted, as well as on the cooling systems choice. The thermal storage systems allow electric power generation by the CSP plant during times with no sunlight and a constant dispatch of energy in power grid. Generation costs (LCOE) are influenced by the type of physical arrangement of a CSP plant. Operational, installation and maintenance costs may be reduced when the CSP plant is operating in parallel with a biomass thermoelectric plant, since they can share turbine-generator groups and cooling systems. The CSP plant can generate power for the thermoelectric plant during low sugar cane grinding, times in which biomass thermoelectric plant doesn't work. When in high sugar cane grinding, biomass thermoelectric plant can generate power during the night and the CSP plant during the day, dismissing the use of thermal storage systems.

Keywords: Concentrated Solar Power. Solar Irradiation. Biomass Thermoelectric. Thermal Storage Systems. Cooling Systems

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Inclinação do eixo imaginário da Terra.	4
Figura 2- Mapa de irradiação solar direta normal no mundo.	6
Figura 3- Mapa de irradiação solar global no mundo.	6
Figura 4- Mapa de irradiação direta no Brasil.....	7
Figura 5- Mapa de irradiação solar global no Brasil..	8
Figura 6- Classificação dos tipos de coletores solares.....	9
Figura 7- Sistema de Torre Solar.	12
Figura 8- Diagrama de funcionamento do sistema de Torre Solar, em Fuentes de Andalucía, Espanha..	13
Figura 9- Coletor Canal Parabólico.	14
Figura 10- Movimentação em relação à posição solar.	15
Figura 11- Integração com ciclo combinado.....	16
Figura 12- Refletor Linear Fresnel.....	17
Figura 13- Refletor Linear Fresnel integrado à um ciclo combinado.	18
Figura 14- Refletor Linear Fresnel Compacto.	19
Figura 15- Sistema de Disco Parabólico.	20
Figura 16- Sistema de Disco Parabólico e incidência solar no receptor.....	20
Figura 17- Sistema WCC de passagem única.....	23
Figura 18- Sistemas WCC circulante evaporativo.	23
Figura 19- Torre de resfriamento dos sistemas WCC circulante evaporativo. .	24
Figura 20- Sistema de resfriamento direto ACC.....	25
Figura 21 - Sistema direto ACC da heliotérmica Genesis Solar Energy Project, localizada nos Estados Unidos.....	26
Figura 22- Esquema de funcionamento do sistema indireto ACC (Heller System).	27
Figura 23- Sistema de resfriamento híbrido.	28
Figura 24- Esquema de funcionamento de uma heliotérmica com armazenamento térmico e sistema de resfriamento híbrido.....	31
Figura 25- Capacidade instalada cumulativa entre os anos de 2000 e 2012 das centrais eólicas, fotovoltaicas, biogás, heliotérmicas e fotovoltaica de concentração.....	32

Figura 26- Curva baseada na previsão do LCOE até o ano de 2030 das tecnologias heliotérmicas (CSP), fotovoltaica de concentração (CPV) e fotovoltaica (PV).	34
Figura 27- Esquema de funcionamento de uma heliotérmica em paralelo com a Usina Jalles Machado.	43
Figura 28- Foto aérea da Usina Jalles Machado.....	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Tipos de coletores solares térmicos.....	11
Quadro 2- Consumo de água em heliotérmicas.....	28
Quadro 3- Conversão dos valores do LCOE de Euro para Real do ano de 2013.....	35
Quadro 4- Conversão dos valores do LCOE de Euro para Real do ano de 2013 para as centrais heliotérmicas.....	37
Quadro 5 - Comparação entre as 4 centrais heliotérmicas existentes.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS

ACC	<i>Air-cooled Condenser</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CPC	<i>Compound Parabolic Collector</i>
CPV	<i>Concentrated Photo Voltaic</i>
CSP	<i>Concentrated Solar Power</i>
DIF	<i>Diffuse Horizontal Irradiation</i>
DNI	<i>Direct Normal Irradiation</i>
ETC	<i>Evacuated Tube Collector</i>
EUR	Euro
FPC	<i>Flat Plate Collector</i>
GHI	<i>Global Horizontal Irradiation</i>
LCOE	<i>Levelized Cost of Electricity</i>
PV	<i>Photo Voltaic</i>
USD	Dólar Americano
WCC	<i>Water-cooled Condenser</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO	2
1.2. CORPO DO TRABALHO	2
2. A ENERGIA SOLAR.....	4
2.1. INTRODUÇÃO.....	4
2.2. IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA, DIFUSA E GLOBAL.....	5
3. TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR.....	9
4. TIPOS DE COLETORES DE CONCENTRAÇÃO SOLAR	12
4.1. SISTEMAS DE TORRE SOLAR	12
4.1.1. Vantagens e desvantagens dos sistemas de Torre Solar	13
4.2 SISTEMAS DE CANAL PARABÓLICO.....	14
4.2.1. Vantagens e desvantagens dos sistemas de Canal Parabólico	16
4.3. REFLETOR LINEAR FRESNEL	17
4.3.1. Vantagens e desvantagens dos sistemas Linear Fresnel	18
4.4. SISTEMAS DE DISCO PARABÓLICO	19
4.4.1. Vantagens e desvantagens dos sistemas de Disco Parabólico	21
5. SISTEMAS DE RESFRIAMENTO EM CENTRAIS HELIOTÉRMICAS	22
5.1. SISTEMAS WCC	22
5.1.1. Sistemas WCC de passagem única	22
5.1.2. Sistemas Wcc circulante evaporativo.....	23
5.2. SISTEMAS ACC	25
5.2.1. Sistema direto ACC	25
5.2.2. Sistema indireto ACC	26
5.3. SISTEMAS DE RESFRIAMENTO HÍBRIDOS	27
5.4 CONSUMO DE ÁGUA.....	28
6. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO TÉRMICO	30
7. COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE CONCENTRAÇÃO SOLAR...	32
8. CUSTOS	34
9. ESCOLHA DO LOCAL NO CENTRO-OESTE BRASILEIRO PARA A INSTALAÇÃO DE UMA CENTRAL HELIOTÉRMICA	40
10. CONCLUSÕES	46
11. BIBLIOGRAFIA	48
12. ANEXOS	51

1. INTRODUÇÃO

As fontes de energia renováveis diversificam a matriz energética nacional e reduzem a dependência dos combustíveis fósseis, que são responsáveis pela emissão de gases que provocam o efeito estufa.

Apesar não ter uma participação expressiva na geração de energia elétrica mundial, as fontes renováveis de energia possuem boas expectativas de crescimento. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2022, no ano de 2013, 38,5% da oferta interna de energia foi de petróleo e seus derivados, sendo que a participação da fonte hidráulica foi de 14%. A participação das demais fontes renováveis ainda apresenta uma porcentagem baixa. A tendência é que a participação de energias renováveis no Brasil aumente de 4,1% para 5,2% em 2022. (1)

Este crescimento é impulsionado pela expansão do parque eólico nacional, proveniente de leilões de comercialização de energia voltados exclusivamente para a fonte eólica. O Brasil possui um parque eólico com capacidade instalada de 5,1 MW. (2)

Os longos períodos de estiagem comprometeram os sistemas hídricos nacionais. A fonte hidráulica representou 70,6% da geração de energia elétrica no Brasil em 2013. (1)

Para suprir a demanda de energia elétrica diante dos períodos de estiagem prolongados, as termelétricas tiveram sua produção ampliada. Isso fez com que o custo da energia elétrica para o consumidor aumentasse. O custo da energia gerada pelas usinas hidrelétricas é menor do que o das centrais eólicas, solares e termelétricas no Brasil.

O Sol é uma grande fonte de energia disponível na Terra e seu potencial pode ser melhor aproveitado. O uso da energia solar para a geração de energia elétrica tem se desenvolvido, podendo-se destacar a energia solar fotovoltaica e a solar térmica.

A fotovoltaica transforma diretamente os fótons de energia da radiação solar em energia elétrica, por meio de painéis solares feitos com materiais semicondutores. A solar térmica abrange três tipos de conversão de energia: de radiação para calor, de calor para energia térmica e de energia mecânica para eletricidade.

Em uma usina termelétrica convencional, a geração de energia elétrica provém da queima de um combustível fóssil. O calor proveniente da queima vaporiza a água de caldeiras. O vapor de água em alta pressão é direcionado para a turbina, que movimenta um gerador. Esse vapor de água é posteriormente condensado e redirecionado para as caldeiras.

A tecnologia heliotérmica, internacionalmente conhecida como *Concentrated Solar Power* (CSP), é o principal assunto deste trabalho. Nela, a radiação solar é convertida em energia térmica por meio dos concentradores solares, que é, posteriormente, convertida em energia elétrica através de sistemas térmicos com turbinas e geradores.

As heliotérmicas também são conhecidas como centrais termosolares por possuírem funcionamento semelhante às termelétricas, mas o calor transferido para a água é resultante do aquecimento de um fluido, realizado por concentradores solares.

No Brasil inexistem centrais heliotérmicas em operação, apesar do país possuir um elevado potencial de irradiação solar. Essa tecnologia é nova e de custo elevado, que pode diminuir com o incentivo para fabricação de peças e equipamentos nacionalmente.

A semelhança entre o sistema de funcionamento das heliotérmicas e das termelétricas permite a operação simultânea das duas fontes com o compartilhamento de alguns equipamentos.

1.1. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo explicar o funcionamento das centrais heliotérmicas, abordando os diferentes tipos de concentradores solares, apresentar suas vantagens, desvantagens, sistemas de resfriamento, sistemas de armazenamento térmico e custos (LCOE), assim como determinar um local no Centro-oeste brasileiro para a instalação de uma central heliotérmica.

1.2. CORPO DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em capítulos. O primeiro capítulo, A Energia Solar, explica como a radiação solar na superfície terrestre é influenciada pela posição da Terra. Além disso, mostra qual tipo de irradiação solar é aproveitada pela

central heliotérmica e quais as regiões apresentam os maiores potenciais de irradiação solar.

Em seguida, o capítulo Tecnologias de Conversão de Energia Solar mostra quais são os tipos de tecnologias existentes para converter energia solar em energia térmica e elétrica.

O capítulo Tipos de Coletores de Concentração Solar é subdividido em 4 subcapítulos, um para cada tipo de coletor de concentração solar: Torre Solar, Canal Parabólico, Linear Fresnel e Disco Parabólico. Estes 4 subcapítulos explicam o funcionamento, vantagens e desvantagens de cada tipo de coletor.

O capítulo seguinte, Sistemas de Resfriamento em Centrais Heliotérmicas, trata da importância desse sistema para as centrais heliotérmicas e divide-se em 3 subcapítulos que abordam as configurações distintas para o sistema de resfriamento: Sistemas WCC, Sistemas ACC e Sistemas de Resfriamento Híbridos.

O capítulo Sistemas de Armazenamento Térmico aborda os benefícios que esse sistema complementar traz às centrais heliotérmicas e como estes sistemas afetam no desempenho da usina.

Posteriormente, o capítulo Comparação Entre os Sistemas de Concentração Solar realiza a comparação entre as 4 diferentes configurações das centrais heliotérmicas e também as compara com as centrais fotovoltaicas e fotovoltaicas de concentração.

O capítulo de Custos analisa o custo unitário de produção de energia nas centrais heliotérmicas de acordo com o tipo de instalação e incidência de irradiação solar por área.

O último capítulo chama-se: Escolha do local no Centro-oeste brasileiro para a instalação de uma central heliotérmica. Ele aborda os critérios para determinação do local adequado para a construção de uma heliotérmica e define um local no Centro-oeste brasileiro propício à instalação dessa usina.

2. A ENERGIA SOLAR

2.1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de radiação solar também é conhecida como energia total incidente sobre a superfície terrestre, que é influenciada pela inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira e pela trajetória elíptica da Terra ao redor do Sol. A Figura 1 mostra a incidência dos raios solares na Terra, conforme a inclinação de seu eixo imaginário.

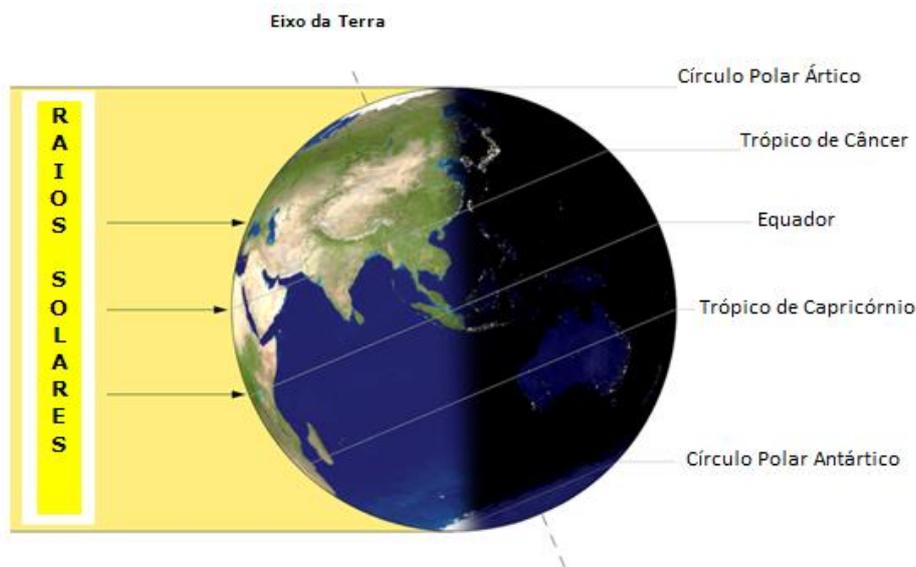


Figura 1- Inclinação do eixo imaginário da Terra. Modificado. Fonte: Já Passei, disponível em <<http://www.japassei.pt/espreitar-os-conteudos---materiais/geografia-7---clima-e-formacoes-vegetais->>. Acesso em outubro 2014.

Devido à inclinação do eixo imaginário da Terra, os raios solares atingem a superfície terrestre com diferentes graus de inclinação. A distância percorrida por estes raios até a superfície terrestre é maior quanto maior for a latitude. O posicionamento relativo do sol em relação à superfície terrestre nos horários de nascer e pôr do Sol também influencia a distância percorrida pelos raios solares até a superfície.

A radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica para aquecimento de fluidos e para geração de potência mecânica ou elétrica. Conforme o tipo de material sob o qual a radiação solar incide, ela pode ser convertida diretamente em energia elétrica, como é o caso dos sistemas fotovoltaicos. (3)

2.2. IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA, DIFUSA E GLOBAL

A radiação solar recebida acima da atmosfera é denominada radiação solar extraterrestre. A partir dos anos 70 foi possível medir a intensidade da radiação solar fora da atmosfera, devido à evolução de balões atmosféricos e aeronaves espaciais. Antes disso, os valores de radiação solar eram estimados, já que as medidas eram realizadas na superfície da Terra.

A variação de distância entre a Terra e o Sol influencia na intensidade da radiação solar extraterrestre. Segundo Lopes (2004), a distribuição espectral da radiação solar que incide na superfície da Terra e sua intensidade dependem das condições atmosféricas e da massa atmosférica atravessada pela radiação.

A irradiação solar direta, ou *Direct Normal Irradiation* (DNI), é definida pela parcela da radiação que continuou seu caminho sem ser espalhada pela atmosfera. A irradiação solar difusa, ou *Diffuse Horizontal Irradiation* (DIF), é a parcela da radiação que sofreu modificações em sua trajetória ao atravessar a atmosfera, como ao passar por nuvens. Com o tempo nublado, a irradiação difusa é sempre superior à direta. A irradiação global, ou *Global Horizontal Irradiation* (GHI), é a soma das parcelas direta e difusa.

A medição da radiação solar é de extrema importância para conhecer o recurso solar da região e se fazer a melhor análise para implantação do sistema solar de geração de energia.

O mapa mostrado na Fig. 2 apresenta a irradiação solar direta média anual no mundo em 2013. A unidade que caracteriza a irradiação solar é kWh/m². Bons valores de irradiância solar direta são geralmente encontrados em regiões semiáridas, que apresentam céu claro a maior parte do tempo. A irradiância solar direta é significativamente melhor quanto maior for a altitude, onde a absorção e a dispersão de luz solar são muito menores.

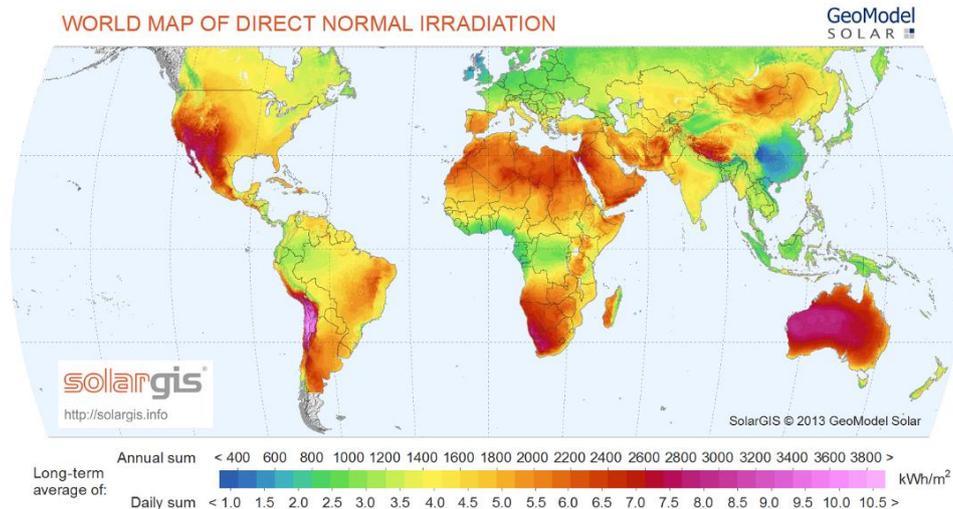


Figura 2- Mapa de irradiação solar direta normal no mundo. Fonte: SolarGIS, disponível em <<http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI>> Acesso em junho 2014.

Os melhores valores de irradiância solar direta estão geralmente entre 10° e 40° de latitude Norte ou Sul. A atmosfera próxima à Linha do Equador é, na maioria das vezes, muito nublada e úmida no verão. Em latitudes muito elevadas, o tempo normalmente é muito nublado.

Devido ao posicionamento da Terra, as faixas territoriais situadas na Zona Intertropical (Fig. 3) recebem intensas quantidades de luz solar e apresentam elevados valores de irradiação solar global, possuindo temperaturas mais elevadas.

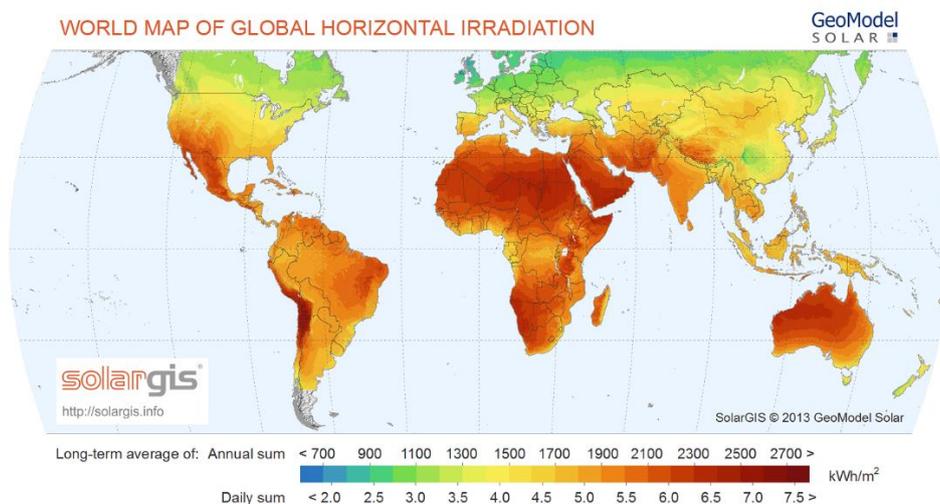


Figura 3- Mapa de irradiação solar global no mundo. Fonte: SolarGIS, disponível em <<http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI>> Acesso em junho 2014.

A Figura 4 apresenta o mapa de irradiação direta (DNI) anual média no Brasil. Nota-se que o maior potencial está na faixa que se estende do norte do Mato Grosso do Sul ao Ceará. A região nordeste, principalmente na Bahia, e o norte de Minas Gerais apresentam os maiores valores de irradiação direta, chegando a aproximadamente 2.300 kWh/m² por ano.

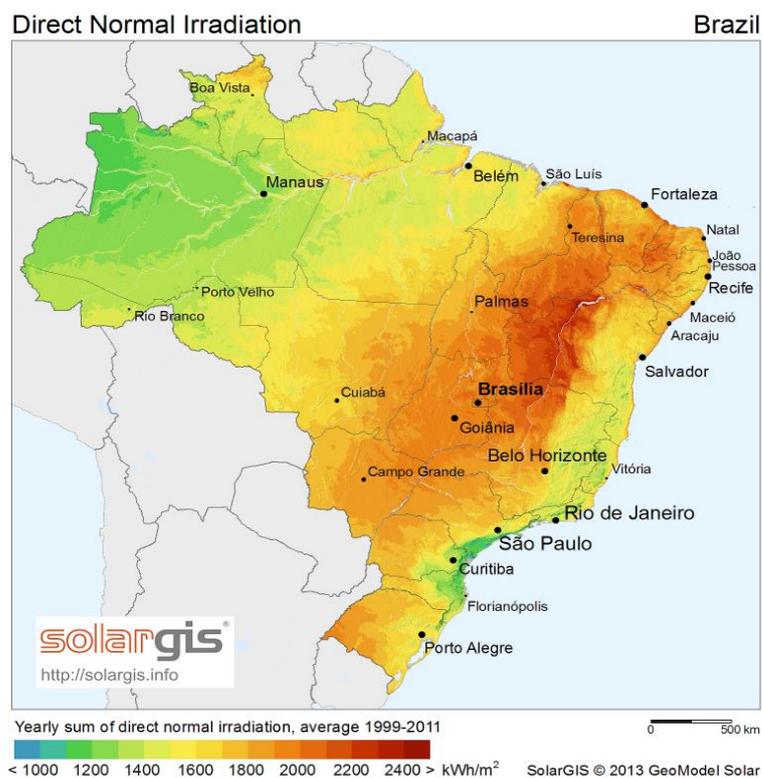


Figura 4- Mapa de irradiação direta no Brasil. Fonte: SolarGIS, disponível em <<http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI>> Acesso em junho 2014.

É fundamental conhecer os valores de irradiação direta para determinar se o local escolhido possui valores de irradiação direta requeridos pelas centrais heliotérmicas.

Valores de DNI abaixo de 1.600 kWh/m² são considerados insuficientes para o funcionamento de uma central heliotérmica. A viabilidade de heliotérmicas em locais com valores entre 1.600 kWh/m² e 2.000 kWh/m² por ano depende do preço do equipamento e do preço da energia, pois esses valores de DNI ainda não são ideais para o funcionamento de centrais heliotérmicas. Valores de DNI acima de 2.000 kWh/m² são ideais para o funcionamento das heliotérmicas. (4)

A região da Bahia e do norte de Minas gerais também possui o maior potencial de irradiação global (GHI) anual média (Fig. 5). Estas regiões possuem temperaturas mais elevadas do que as regiões com baixos valores de irradiação global.



Figura 5- Mapa de irradiação solar global no Brasil. Fonte: SolarGIS, disponível em <<http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps-GHI>> Acesso em junho 2014.

A região Centro-oeste possui valores de irradiação direta que variam entre 1.900 kWh/m² e 2.100 kWh/m² por ano, aproximadamente, mostrando-se uma região apta à construção de uma central heliotérmica.

3. TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR

A conversão direta da energia solar em energia elétrica ocorre pelos efeitos da radiação solar sobre materiais semicondutores. (3). Segundo Almeida (2013), destacam-se duas tecnologias de energia solar: a fotovoltaica e a solar térmica.

A fotovoltaica transforma diretamente os fótons de energia da radiação solar em energia elétrica através de painéis solares feitos com materiais semicondutores. A geração de energia elétrica por essa tecnologia pode estar ligada ou não à rede elétrica. A geração de energia elétrica por painéis fotovoltaicos de forma descentralizada e em pequenas escalas ligadas à rede tem crescido e está ganhando destaque em todo o mundo. Além disso, existem usinas de médio porte que geram energia elétrica fotovoltaica e que inserem essa energia produzida na rede elétrica. (5)

A tecnologia solar térmica abrange três tipos de conversão de energia: de radiação para calor, de calor para energia térmica e de energia mecânica para eletricidade. Os coletores solares térmicos podem ser divididos em duas categorias, de concentração ou não, conforme visto na Fig.6.

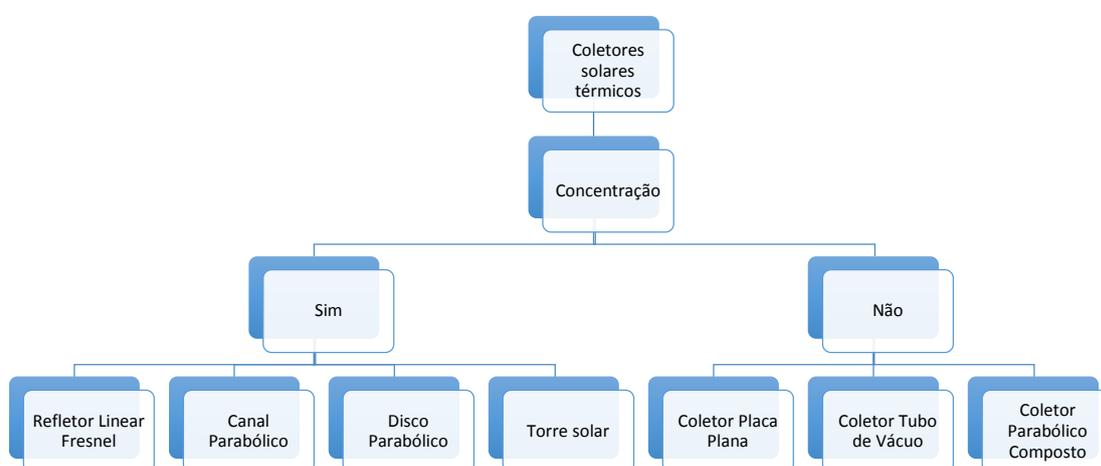


Figura 6- Classificação dos tipos de coletores solares. Adaptado de (6).

Pode-se dividir os coletores solares térmicos em duas categorias, de concentração solar ou não (Fig. 6). Os coletores de concentração solar concentram a luz solar em um ponto ou em uma linha, aquecendo os fluidos de trabalho a altas temperaturas. São utilizados tanto para geração de energia elétrica quanto para dessalinização de água salobra. (6)

O capítulo 4 deste trabalho aborda o funcionamento dos concentradores solares do tipo Linear Fresnel, Canal Parabólico, Disco Parabólico e Torre Solar.

Os coletores que não concentram a luz solar convertem a radiação solar diretamente em calor e são comumente utilizados para aquecimento de água residencial. Essa tecnologia de conversão solar térmica é a mais difundida no mercado.

Os coletores de placa plana, conhecidos como *Flat Plate Collectors* (FPC), possuem uma faixa de temperatura de aquecimento de água que varia de 30°C a 80°C (Quadro 1). Eles são compostos por tubos absorvedores, por onde circula o fluido a ser aquecido, por um vidro situado à uma certa distância dos tubos absorvedores, afim de reduzir as perdas por convecção e radiação para a atmosfera, e por um isolamento de fundo, afim de reduzir as perdas por condução dos tubos para o fundo do coletor.

Os Coletores Tubo de Vácuo, conhecidos com *Evacuated Tube Collector* (ETC), são compostos por tubos de vidro duplo concêntrico evacuados que envolvem um tubo de cobre, por onde circula a água a ser aquecida. Esse sistema é capaz de aquecer a água até 200°C.

Os Coletores Parabólicos Compostos, conhecidos como *Compound Parabolic Collector* (CPC), conseguem aquecer a água à uma temperatura maior do que os coletores FPC e ETC, podendo chegar até 240°C. Assim como os demais coletores, são compostos por tubos absorvedores, por onde circula a água a ser aquecida, e possuem um vidro situado acima da estrutura, que permite a entrada de luz solar e que reduz as perdas por convecção e radiação para a atmosfera. O tubo absorvedor está situado na linha focal de superfícies refletoras parabólicas.

O Quadro 1 apresenta os tipos de coletores existentes no mercado, como é a estrutura característica do absorvedor, qual a faixa de temperatura de aquecimento do fluido de trabalho e o tipo de movimentação da estrutura.

Quadro 1- Tipos de coletores solares térmicos. Adaptado de (6).

Movimento	Tipo de coletor (Receptor)	Tipo de concentrador (Absorvedor)	Intervalo de temperatura (°C)
Estacionário	Coletor de Placa Plana (<i>Flat Plate Collector</i>)	Plano	30 – 80
	Coletor Tubo de Vácuo (<i>Evacuated Tube Collector</i>)	Tubular	50 – 200
	Coletor Parabólico Composto (<i>Compound Parabolic Collector</i>)	Tubular	60 – 240
Seguido de um eixo	Refletor Linear Fresnel (<i>Linear Fresnel Reflector</i>)	Tubular	60 - 300
	Coletor Canal Parabólico (<i>Parabolic Trough Collector</i>)	Tubular	60 – 400
	Coletor Canal Cilíndrico (<i>Cylindrical Trough Collector</i>)	Tubular	60 – 400
Seguido de dois eixos	Refletor Disco Parabólico (<i>Parabolic Dish Reflector</i>)	Pontual	100 – 800
	Coletor Torre Solar (<i>Heliostat Field Collector</i>)	Pontual	150 - 2000

A tecnologia heliotérmica, ou *Concentrated Solar Power (CSP)*, utiliza a concentração de raios solares para geração de energia elétrica. Sua estrutura é composta por espelhos que direcionam a luz solar para um receptor. Nele circula o fluido de trabalho a ser aquecido, podendo ser óleo sintético ou sal fundido. Estes sistemas podem operar com ciclo termodinâmico Rankine ou Brayton, dependendo de suas configurações. (7)

Diferentemente das placas solares fotovoltaicas, as heliotérmicas utilizam somente a componente direta de radiação solar e produzem calor e energia somente em regiões com altos índices de radiação solar direta.

4. TIPOS DE COLETORES DE CONCENTRAÇÃO SOLAR

Existem 4 configurações diferentes dos coletores de concentração solar: Torre Solar, Canal Parabólico, Linear Fresnel e Disco Parabólico. Eles diferem em relação às estruturas físicas, como formato e dimensões dos espelhos, movimentação em relação ao sol e, também, em relação à temperatura atingida pelo fluido de trabalho após o aquecimento.

4.1. SISTEMAS DE TORRE SOLAR

Os sistemas de torre solar utilizam um campo circular, ou semicircular, de espelhos de grandes dimensões (Fig. 7) chamados heliostatos, que realizam um seguimento individual do Sol a dois eixos e que concentram a radiação solar num receptor central montado no topo de uma torre. (8)



Figura 7- Sistema de Torre Solar. Fonte: Comisión de Energía, disponível em <http://comisiondeenergiachile.wordpress.com/> Acesso em maio 2014.

Os heliostatos são compostos por uma superfície refletora, um suporte estrutural e um mecanismo de rastreamento solar. Nessa tecnologia, os fluidos de trabalho são principalmente o sal fundido e o vapor de água.

A Figura 8 ilustra o funcionamento de um sistema de Torre Solar. A radiação solar é concentrada por meio de heliostatos (1) na torre central (3), de modo que os sais fundidos que estavam inicialmente em um tanque frio (2) atinjam altas temperaturas. Depois de aquecidos no receptor, passam por um tanque de armazenamento térmico (4) e em seguida são direcionados para um

trocador de calor (5), gerando vapores necessários para mover as turbinas (6), que fazem girar o gerador (7). A eletricidade produzida passa por um transformador (8) antes de ser inserida na rede de transmissão.

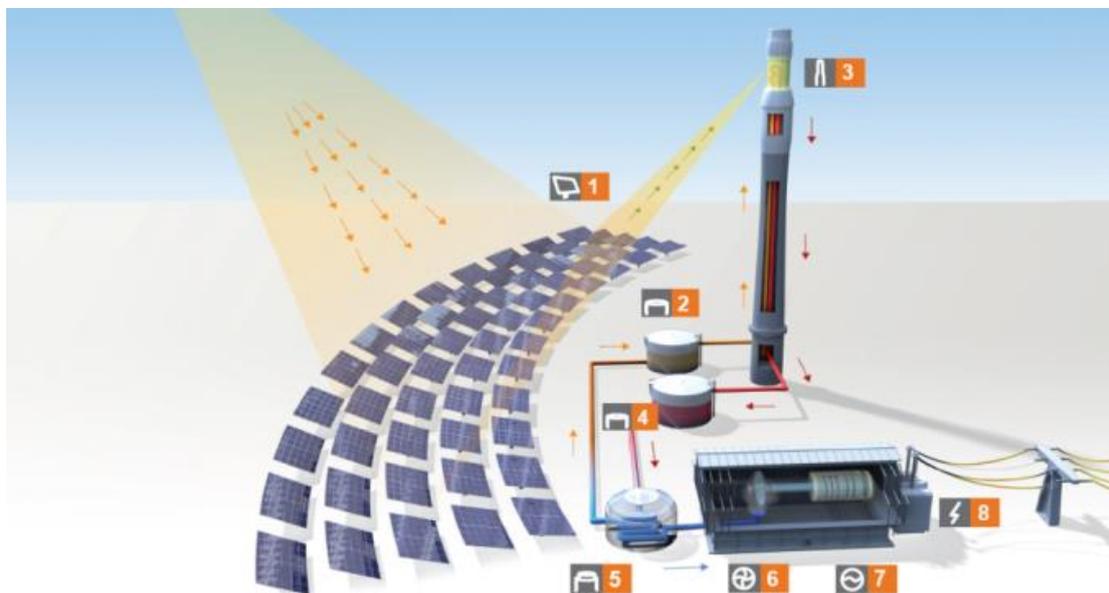


Figura 8- Diagrama de funcionamento do sistema de Torre Solar, em Fuentes de Andalucía, Espanha. Fonte: Departamento de planejamento e sustentabilidade, disponível em <www20.gencat.cat> Acesso em junho 2014.

As temperaturas do fluido de trabalho chegam até 2.000°C nesse tipo de central heliotérmica, sendo muito maiores do que as temperaturas alcançadas nos outros sistemas de concentração solar.

“Isso permite utilização de turbinas de alta potência, com maior eficiência de conversão de energia mecânica na turbina de vapor para energia elétrica no gerador, além de não necessitar de instalação de tubos absorvedores de calor.” (BIANCHINI, 2013, p.22)

4.1.1. Vantagens e desvantagens dos sistemas de Torre Solar

O armazenamento térmico de energia a altas temperaturas representa a maior vantagem dos sistemas de torre solar quando comparados com as outras tecnologias de concentração solar existentes, pois aumenta o fator de capacidade e permite uma estratégia de geração flexível para maximizar o valor da eletricidade gerada, bem como para alcançar maiores níveis de eficiência.

As altas temperaturas podem permitir uma maior eficiência no ciclo a vapor e reduzir o consumo de água para resfriamento do condensador. Elas

também permitem maiores diferenças de temperatura no sistema de armazenamento, reduzindo custos ou permitindo maior armazenamento pelo mesmo custo. (9) Estes sistemas são também a melhor opção para locais com terrenos acidentados, uma vez que heliostatos podem ser dispostos de forma individual. (8)

As centrais de torre solar permitem a operação híbrida. Entre as desvantagens estão os elevados custos de investimentos e do sistema eletrônico de rastreamento solar, que é individual para cada heliostato.

4.2. SISTEMAS DE CANAL PARABOLICO

Nos sistemas de canal parabólico utilizam-se espelhos refletores com uma forma cilindro parabólica para concentrar a radiação solar num tubo receptor, termicamente eficiente, situado na linha focal da estrutura parabólica (Fig. 9). As matrizes de espelhos podem ser de 100 m de comprimento ou mais, com a abertura curvada de 5 a 6 m. (9)



Figura 9- Coletor Canal Parabólico. Fonte: Sun & Wind Energy. Disponível em < <http://www.sunwindenergy.com/news/new-parabolic-trough-collector-3m-and-gossamer> > Acesso maio 2014.

Estes sistemas são instalados seguindo um eixo Norte-Sul e efetuam o rastreamento solar seguindo a direção Leste-Oeste, conforme visto na Fig. 10. (8) A base da estrutura possui um motor que possibilita o movimento automático de rastreamento solar.

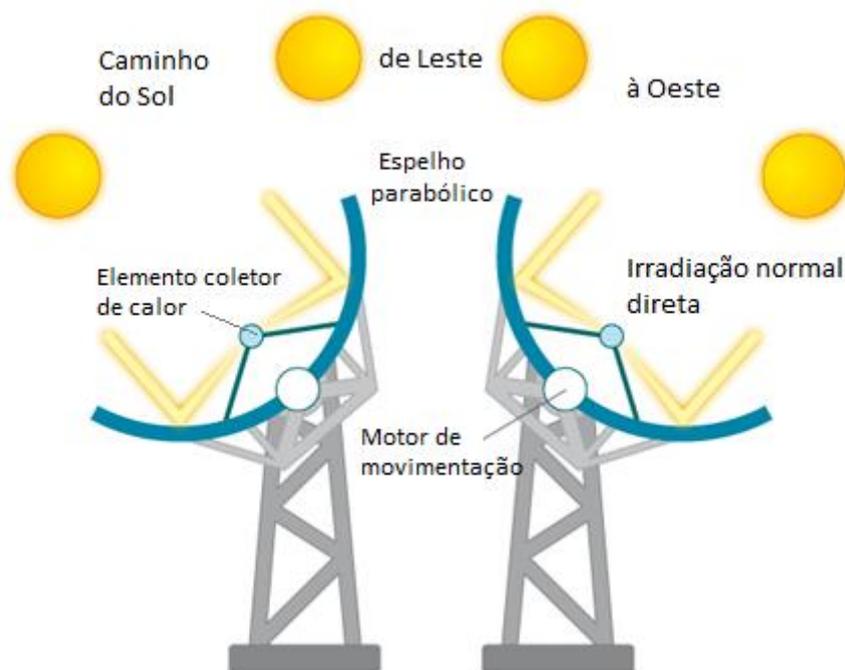


Figura 10- Movimentação em relação à posição solar. Fonte: New Energy News, disponível em < http://nenmore.blogspot.com.br/2010_12_01_archive.html> Acesso em maio 2014. Adaptado.

O elemento coletor de calor é formado por um tubo metálico situado no foco da parábola, conforme visto na Fig. 9. Este tubo é formado por um tubo de vidro concêntrico a um tubo metálico e o espaço existente entre eles é evacuado, reduzindo as perdas por convecção para a atmosfera. (5)

O líquido de transferência de calor é geralmente um óleo sintético, que circula dentro do tubo metálico do elemento coletor de calor.

“Os sistemas solares integrados com ciclo combinado (*Integrated Solar Combined Cycle Systems*, ISCCS) utilizam o calor gerado pelos coletores solares como suplemento ao calor desperdiçado na turbina a gás, por forma a aumentar a capacidade de produção de vapor no ciclo Rankine.” (ALMEIDA, 2013, p.17)

O funcionamento das heliotérmicas de Canal Parabólico (Fig. 11) é similar ao funcionamento das centrais de Torre Solar. O fluido de trabalho é aquecido dentro dos tubos receptores e é direcionado para um trocador de calor. O fluido troca calor com a água, que evapora. Esse vapor é então direcionado para a turbina, que movimenta o conjunto gerador de energia elétrica. A eletricidade produzida passa por um transformador e é inserida na rede elétrica.

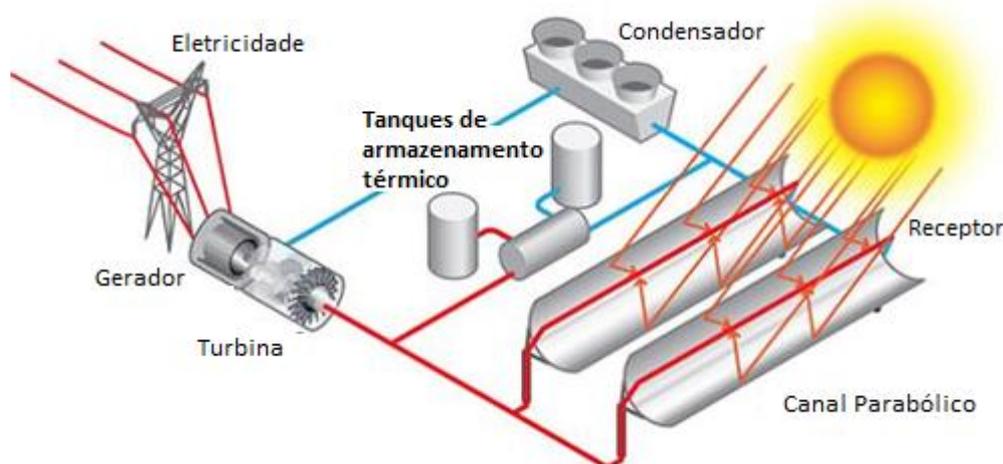


Figura 11- Integração com ciclo combinado. Fonte: Solar Multimedia , disponível em <https://www.eeremultimedia.energy.gov/solar/graphics/linear_concentrator_solar_power_plant_illustration> Acesso em maio 2014. Adaptado.

No ciclo Rankine, é necessário condensar o vapor que já passou pela turbina para que esse seja reintroduzido no ciclo. Essa condensação se dá com o resfriamento a água ou a ar, ou ainda de reforma híbrida.

Este tipo de sistema de concentração solar aquece o fluido de trabalho a temperaturas próximas dos 400°C nos elementos coletores de calor. Atualmente, a tecnologia CSP que utiliza cilindros parabólicos é aquela com maior participação no mercado mundial. (10)

4.2.1. Vantagens e desvantagens dos sistemas de Canal Parabólico

A tecnologia de concentração solar melhor desenvolvida é a dos sistemas de Canal Parabólico. (8)

A utilização do terreno onde os coletores de canal parabólico estão dispostos é aproveitado de forma eficiente, já que os coletores estão dispostos em filas. Essa configuração dos coletores solares só é vantajosa em locais cujo terreno possui baixas inclinações, pois esta inclinação pode afetar o direcionamento dos raios solares para o tubo absorvedor.

A temperatura de operação do óleo sintético como fluido de trabalho nesse tipo de sistema fica limitada a no máximo 500°C e, desta forma, limita a eficiência do ciclo de potência para esses sistemas de concentração solar.

4.3. REFLETOR LINEAR FRESNEL

Os refletores do tipo Linear Fresnel são constituídos por um conjunto de espelhos planos dispostos em filas direcionando a radiação solar para um tubo receptor situado acima dos espelhos, conforme (Fig. 12). Estes tubos receptores são fixos à estrutura e situam-se dentro de uma estrutura de três faces que não permite passagem de radiação solar, de forma que os raios solares refletidos pelos espelhos entrem somente pela face aberta. (8)



Figura 12- Refletor Linear Fresnel. Fonte: <www.climateactionprogramme.org/climate-case-studies/the_future_of_concentrating_solar_power/> Acesso em maio 2014.

Os espelhos refletores efetuam o seguimento solar a um eixo, acompanhando a movimentação do Sol no sentido Leste-Oeste.

O arranjo físico da estrutura dos sistemas Linear Fresnel ocupa 2/3 da área ocupada pelas estruturas dos sistemas de Canal Parabólico, já que as linhas não fazem sombra umas nas outras. (11)

O funcionamento de uma central heliotérmica com refletores Linear Fresnel é semelhante ao funcionamento das heliotérmicas do tipo Torre Solar e Canal Parabólico. O fluido de trabalho desses sistemas é geralmente água, que recebe calor dos refletores e vaporiza-se. O vapor aciona o conjunto turbina-gerador, gerando energia elétrica. Os vapores de saída da turbina são condensados e redirecionados para os refletores, iniciando um novo ciclo. (Fig. 13)

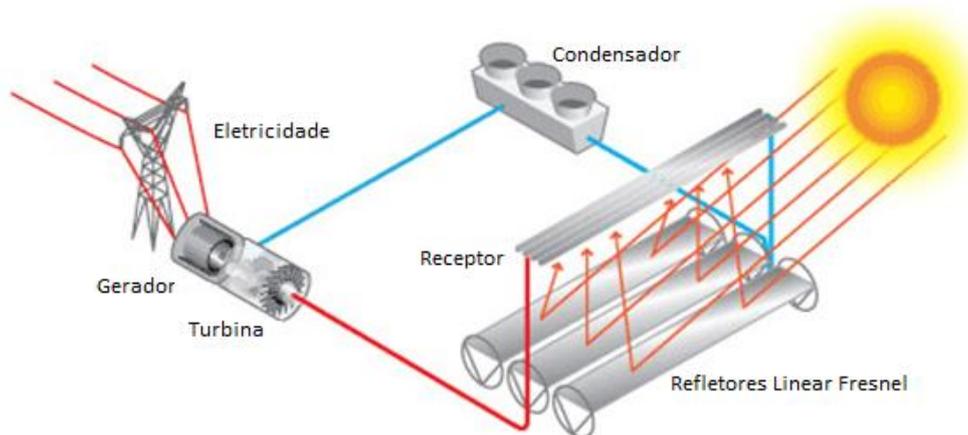


Figura 13- Refletor Linear Fresnel integrado à um ciclo combinado.
 Fonte: < <https://courses.engr.illinois.edu/npre201/webproject/FALL%202011/NPRE201SolarPower/LinSystems.html> > Acesso em maio 2014. Adaptado.

4.3.1. Vantagens e desvantagens dos sistemas Linear Fresnel

Os sistemas Linear Fresnel são capazes de gerar vapor diretamente nos receptores de radiação solar, dispensando a utilização dos trocadores de calor e de um fluido de trabalho.

Apresentam como vantagem o menor espaço ocupado no terreno da central heliotérmica quando comparado aos sistemas de Canal Parabólico. O fato dos refletores situarem-se praticamente paralelos ao chão possibilita uma maior estabilidade estrutural devido à menor interferência dos ventos na sua estrutura. Essa configuração também reduz perdas óticas e os vidros quebram com menor frequência, quando comparada aos demais sistemas refletores. (8)

Assim como os sistemas de Torre Solar, os de refletores lineares Fresnel podem também operar de forma híbrida e possuir um sistema de armazenamento térmico. As temperaturas do fluido de trabalho podem chegar a 370 °C dentro das linhas de aquecimento.

Esse sistema apresenta também como uma de suas vantagens o baixo custo dos espelhos planos quando comparados aos espelhos de canal parabólico. Segundo Almeida (2013) estes sistemas têm como desvantagem o sombreamento entre os espelhos de uma mesma linha à medida que o Sol move-se ao longo do dia.

Como alternativa para resolução do problema, surgiu o Refletor Linear Fresnel Compacto (Fig. 14), que possui múltiplos refletores lineares potenciando a existência de um maior número de fileiras de espelhos planos mais próximos entre si, orientadas alternadamente para o tubo absorvedor.

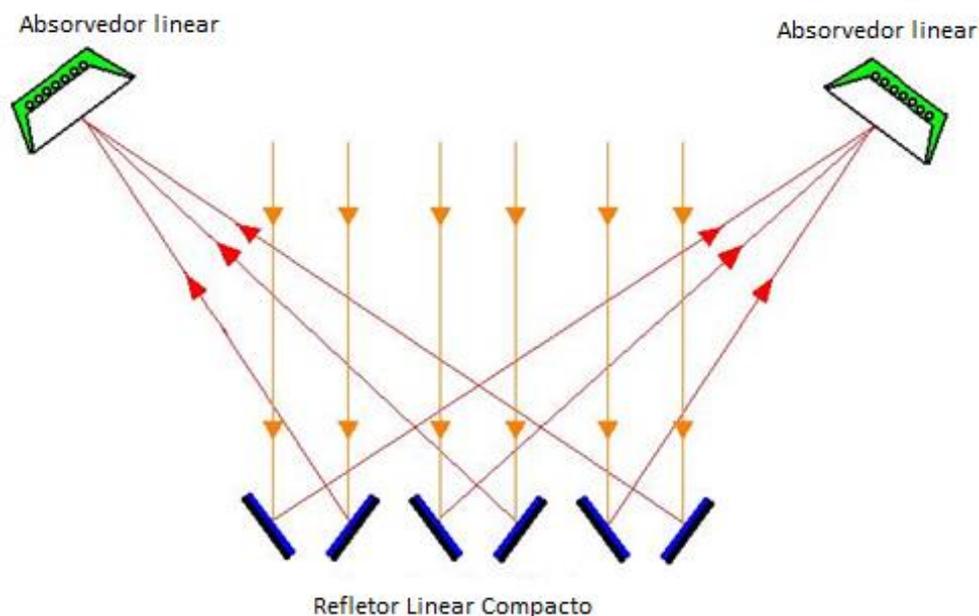


Figura 14- Refletor Linear Fresnel Compacto. Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:CLFR_Alternating_Inclination.JPG> Acesso em maio 2014. Adaptado.

A vantagem adicional desse tipo de configuração tem a ver com um melhor aproveitamento da superfície refletora nos períodos do nascer do sol e pôr-do-sol (6), mantendo-se as características de temperatura de aquecimento do fluido de trabalho e possibilidade de existência de um armazenamento térmico.

4.4. SISTEMAS DE DISCO PARABÓLICO

Um refletor parabólico em forma de disco (Fig. 15) é montado em uma estrutura que efetua o seguimento solar em dois eixos e concentra os raios solares num receptor situado no foco do espelho. A estrutura dos coletores solares e o receptor movem-se juntos à medida em que o conjunto se movimenta durante o rastreo solar.



Figura 15- Sistema de Disco Parabólico. Fonte: Helionotícias, disponível em <<http://www.helionoticias.es/b3.php>> Acesso em maio 2014.

A energia solar refletida pelo Disco Parabólico é absorvida no receptor situado no foco do refletor parabólico (Fig. 16), aquecendo o fluido de trabalho à temperatura próxima de 800°C.

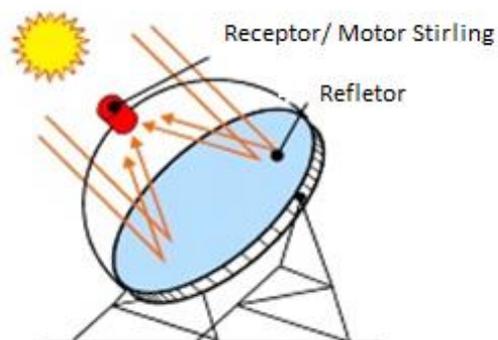


Figura 16- Sistema de Disco Parabólico e incidência solar no receptor. Fonte: Sérgio Silva, disponível em <<http://paginas.fe.up.pt/~ee04016/tema/csp/csp.html>> Acesso em maio 2014.

Esse sistema tem acoplado ao receptor um motor que opera segundo do ciclo termodinâmico de Stirling associado a um gerador, produzindo energia elétrica em consumir água.

Este conjunto é conhecido como unidade de conversão de energia. O receptor utiliza como fluido de trabalho o hidrogênio ou o hélio. (8)

Os motores Stirling operam com o aquecimento e resfriamento de um gás ininterruptamente, movimentando um pistão. Esse tipo de sistema permite a conversão de até 30% da energia irradiante em energia elétrica, cuja potência no sistema gerador pode variar de 5 a 50 kW. (11)

Existem dois tipos de motores Stirling: Cinemático e Pistão Livre. Os motores cinemáticos trabalham com o hidrogênio como fluido de trabalho e têm maiores eficiências do que os motores de pistão livre. Os motores de pistão livre têm o hélio como fluido de trabalho e não produzem atrito durante a operação, o que permite a redução na manutenção requerida pelo equipamento. (9)

4.4.1. Vantagens e desvantagens dos sistemas de Disco Parabólico

Pode ser instalada em terrenos acidentados já que os discos são independentes fisicamente uns dos outros. Além disso, o acoplamento do gerador ao receptor disco parabólico contribui para menores perdas de energia térmica.

Os sistemas de disco parabólico não são capazes de armazenar energia térmica. Isso significa que a capacidade de geração dos discos parabólicos é pequena, sendo mais adequadas para a geração distribuída.

Os sistemas de disco parabólico são capazes de atingir os maiores valores de eficiência entre todos os tipos de sistemas de concentração solar. (9)

Como no ciclo Stirling não há necessidade de consumo de água para resfriamento, os motores Stirling são facilmente resfriados a ar. Desta forma o consumo de água pelos sistemas de Disco Parabólico é muito baixo, sendo utilizada basicamente para limpeza e manutenção dos espelhos.

Estas características tornam as centrais heliotérmicas de Disco Parabólico ideais para a instalação em locais desérticos ou com pouca disponibilidade de água.

Como desvantagem, o custo é relativamente alto para a construção. Unidades à venda estão custam cerca de 6 US\$/W instalado. (11)

5. SISTEMAS DE RESFRIAMENTO EM CENTRAIS HELIOTÉRMICAS

A disponibilidade de água é um problema em áreas áridas, que são as mais propícias à instalação de centrais heliotérmicas. Nestas, a água é utilizada na limpeza dos espelhos, na movimentação das turbinas e no sistema de condensação dos vapores de saída das turbinas.

A condensação do vapor a baixa pressão na saída da turbina é um processo importante na etapa de geração de energia em centrais heliotérmicas.

Ao condensar, há uma diminuição do volume específico de vapor para líquido, que cria um vácuo na saída da turbina. Esse processo aumenta a eficiência da geração de energia no conjunto turbina-gerador. (12)

Os condensadores podem ser resfriados à água, conhecidos como *Water-cooled Condenser* (WCC), ou a ar, conhecidos como *Air-cooled Condenser* (ACC).

O consumo de água por uma central heliotérmica pode ser reduzido com a utilização dos condensadores a ar, porém este uso pode resultar na redução da eficiência global do conjunto gerador de energia. (12) Essa substituição dos sistemas de resfriamento à água para ar gera uma redução no consumo de água das centrais heliotérmicas acima de 90%. (13)

5.1. SISTEMAS WCC

Os condensadores resfriados a água podem ter duas configurações: passagem única e circulante evaporativo. Em ambos os casos, a água absorve calor dos vapores de saída da turbina dentro de um condensador.

5.1.1. Sistemas WCC de passagem única

Nesse tipo de sistema de resfriamento, a água entra no condensador, absorve o calor dos vapores e sai do condensador, não retornando ao sistema, realizando uma passagem única pelo condensador (Fig. 17). Normalmente a água utilizada nesse tipo de sistema de resfriamento provém de rios, lagos ou mares. Com isso, restringe-se a instalação da central heliotérmica em locais com esse tipo de oferta de água.

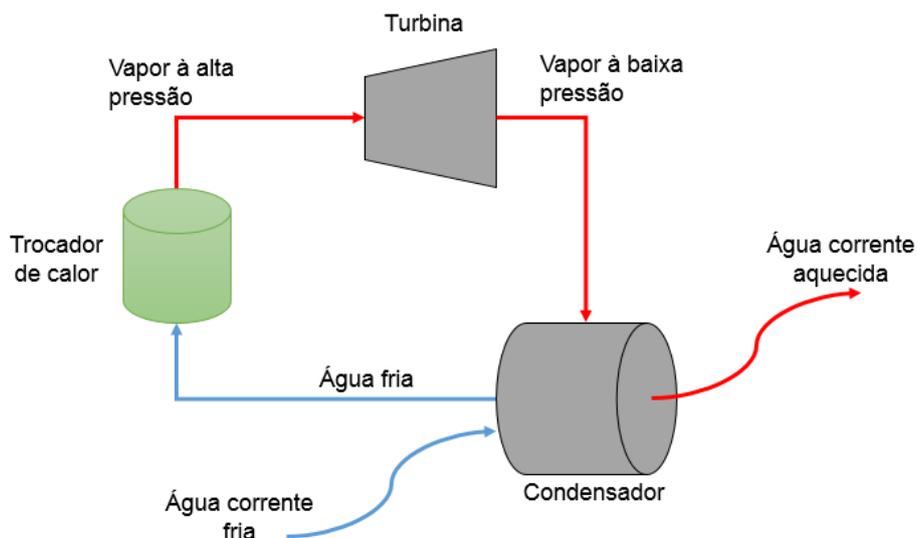


Figura 17- Sistema WCC de passagem única. Adaptado de (12).

As desvantagens desse tipo de sistema de resfriamento são o aumento da temperatura da água após a saída do condensador, que pode causar impactos ao meio ambiente, e o aprisionamento de peixes nos sistemas canalizadores de entrada da água nos condensadores.

5.1.2. Sistemas WCC circulante evaporativo

É o sistema de resfriamento mais comum nas centrais heliotérmicas já instaladas. (12) A água absorve no condensador o calor dos vapores de saída da turbina, sendo direcionada para a torre de resfriamento (Fig. 18).

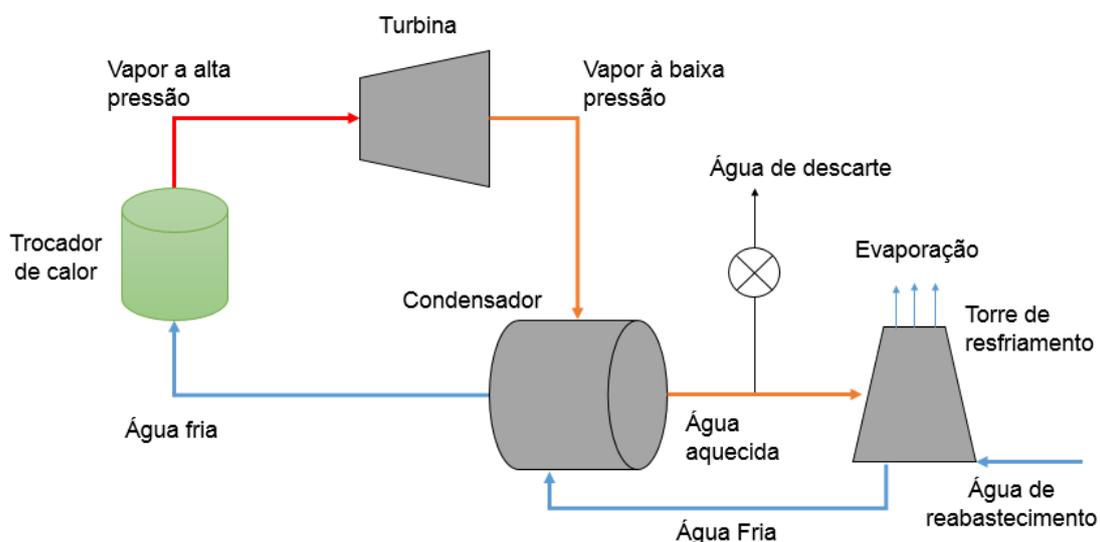


Figura 18- Sistemas WCC circulante evaporativo. Adaptado de (12).

Ao ser inserida na parte superior da torre, a água é liberada por bicos fazendo com que ela passe por diversas placas, aumentando a superfície de contato para a troca de calor. Na base da torre existem entradas de ar, que resfriam a água que foi liberada nas placas internas, fazendo com que parte dessa água evapore (Fig. 19). Podem, também, existir ventiladores no topo da torre que forçam a circulação de ar no interior da torre de resfriamento. A água condensada vai para a base da torre e é redirecionada para o condensador. (14)

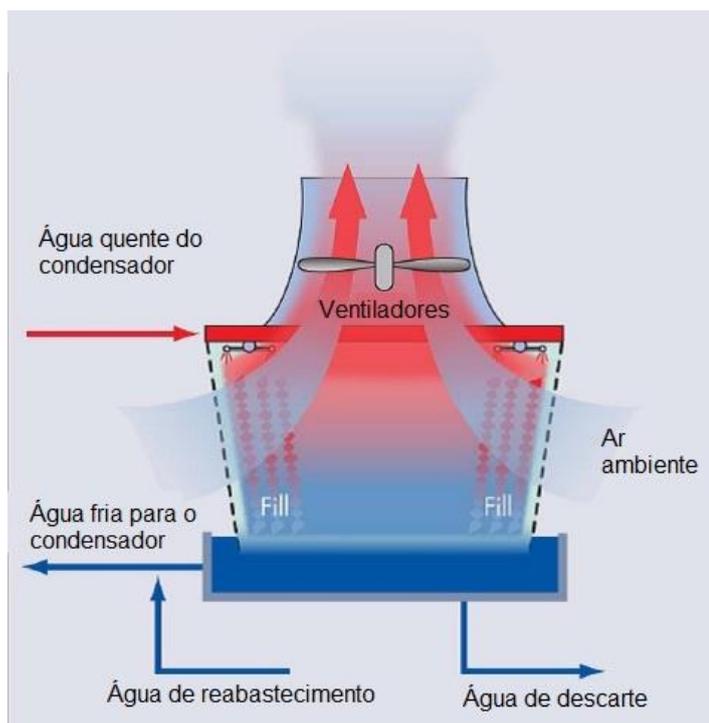


Figura 19- Torre de resfriamento dos sistemas WCC circulante evaporativo. Adaptado de <<http://www.seia.org/policy/power-plant-development/utility-scale-solar-power/water-use-management>>. Acesso em novembro 2014.

À medida em que a água evapora, aumenta a concentração de componentes químicos e minerais presentes na água acumulada na base da torre, de forma que parte dessa água precisa ser drenada constantemente para a remoção desses componentes. Há um reabastecimento constante de água no sistema para compensar o volume de água evaporada e drenada da torre de resfriamento. (12)

Esse tipo de sistema de resfriamento tem como desvantagens o grande volume de água consumida e o descarte da água com elevados teores de sais e impurezas, que pode causar danos ambientais.

5.2. SISTEMAS ACC

Nos condensadores resfriados a ar existem tubos por onde circulam os vapores que saem da turbina. O ar é forçado para passar em volta desses tubos a fim de reduzir a temperatura do vapor, para que este retorne à fase líquida. Podem apresentar duas configurações: sistema direto e indireto.

5.2.1. Sistemas direto ACC

Esse tipo de sistema de resfriamento possui uma estrutura em forma triangular com diversos tubos finos, por onde passa o vapor de saída da turbina (Fig. 20). Na base da estrutura existe um ventilador, que força a passagem de ar entre os tubos. Na troca de calor, os vapores condensam dentro da tubulação e são coletados na base da estrutura, sendo então redirecionados para o tanque de armazenamento térmico.

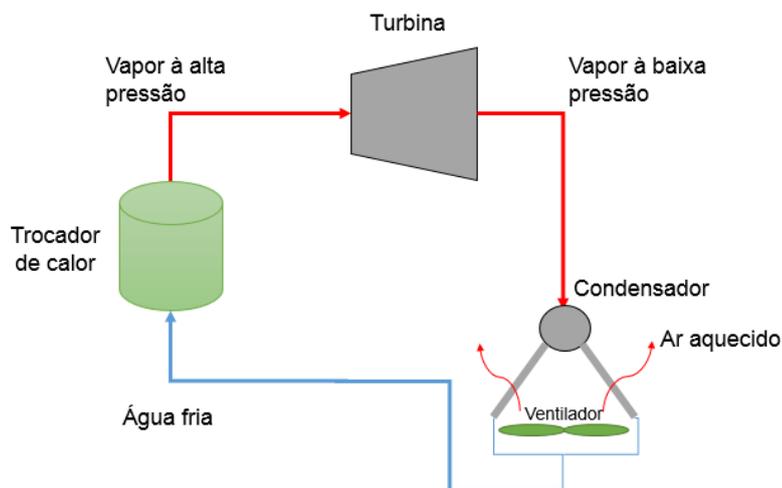


Figura 20- Sistema de resfriamento direto ACC. Adaptado de (12).

A heliotérmica *Genesis Solar Energy Project*, localizada nos Estados Unidos, funciona com a tecnologia de concentração solar do tipo Canal Parabólico e utiliza o sistema direto de condensador a ar (Fig. 21).



Figura 21 - Sistema direto ACC da heliotérmica Genesis Solar Energy Project, localizada nos Estados Unidos. Fonte: National Renewable Energy Laboratory, disponível em <http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=54>. Acesso em novembro 2014.

Estes sistemas podem apresentar menores eficiências no resfriamento do ar dentro dos tubos do condensador quando a temperatura do ar for elevada. (14)

A eficiência do ciclo Rankine é dada pela razão entre o trabalho líquido produzido pela turbina e a entrada de calor. O ciclo caracteriza-se pela entrada de calor a altas temperaturas e pela rejeição de calor a baixas temperaturas. A diferença entre eles é o trabalho produzido pela turbina. Desta forma, ao diminuir a temperatura do dissipador de calor, aumenta a eficiência do ciclo. (15) (16)

Assim, as centrais heliotérmicas que possuem o sistema de resfriamento a ar operam com menores eficiências do que aquelas com sistema de resfriamento a água.

5.2.2. Sistema indireto ACC

Nestes sistemas, o vapor de saída das turbinas é direcionado para uma câmara onde água fria é borrifada diretamente no vapor, fazendo com que o vapor condense e caia no fundo da câmara, conforme visto na Fig. 22. Essa água que está líquida e aquecida é direcionada para uma torre de resfriamento similar às torres utilizadas nos sistemas resfriados a água. Estes sistemas também são conhecidos como Sistemas de Heller.

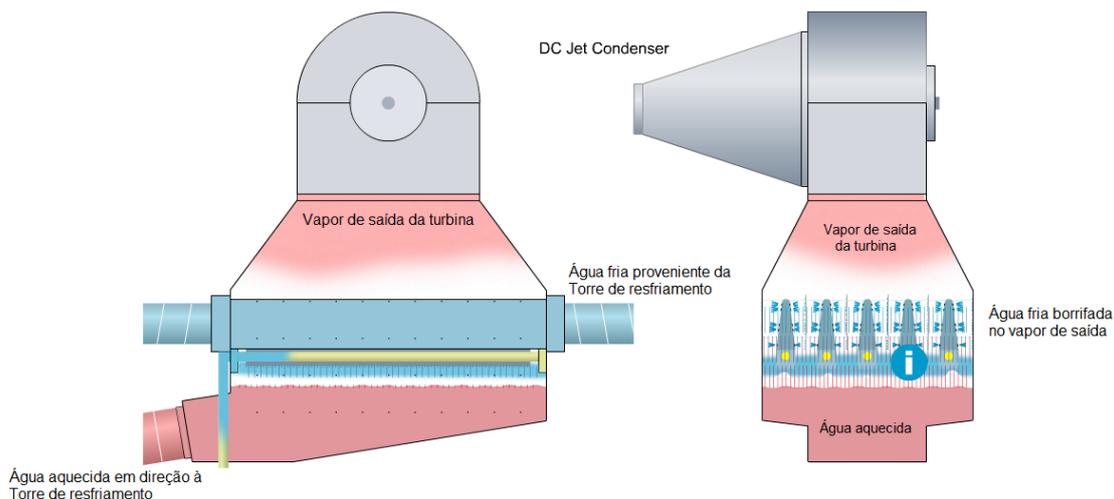


Figura 22- Esquema de funcionamento do sistema indireto ACC (Heller System). Adaptado de <<http://www.gea-energytechnology.com/opencms/opencms/egi/en/cooling/drycooling/Heller-System-GEA.html>>

O consumo de água é reduzido drasticamente nas centrais heliotérmicas com sistema de resfriamento a ar quando comparado ao volume de água necessário para manter o funcionamento adequado dos sistemas de resfriamento a água.

5.3. SISTEMAS DE RESFRIAMENTO HÍBRIDOS

Atualmente quase todas as heliotérmicas em operação utilizam o sistema de resfriamento WCC evaporativo, com exceção das heliotérmicas de configuração Linear Fresnel, que utilizam os sistemas de resfriamento direto ACC. (11)

Em um sistema de resfriamento híbrido, o sistema refrigerado a ar opera em paralelo com o sistema refrigerado a água. A intenção desse tipo de junção de sistemas é reduzir o consumo de água pela heliotérmica mantendo uma eficiência próxima àquela existente em sistemas resfriados a água.

A Figura 23 mostra o esquema de funcionamento de um sistema de resfriamento híbrido. Os vapores que saem da turbina são direcionados tanto para o sistema ACC quanto para o WCC. Após a condensação dos vapores pelos dois sistemas, a água é redirecionada para o tanque de armazenamento térmico, dando início a um novo ciclo.

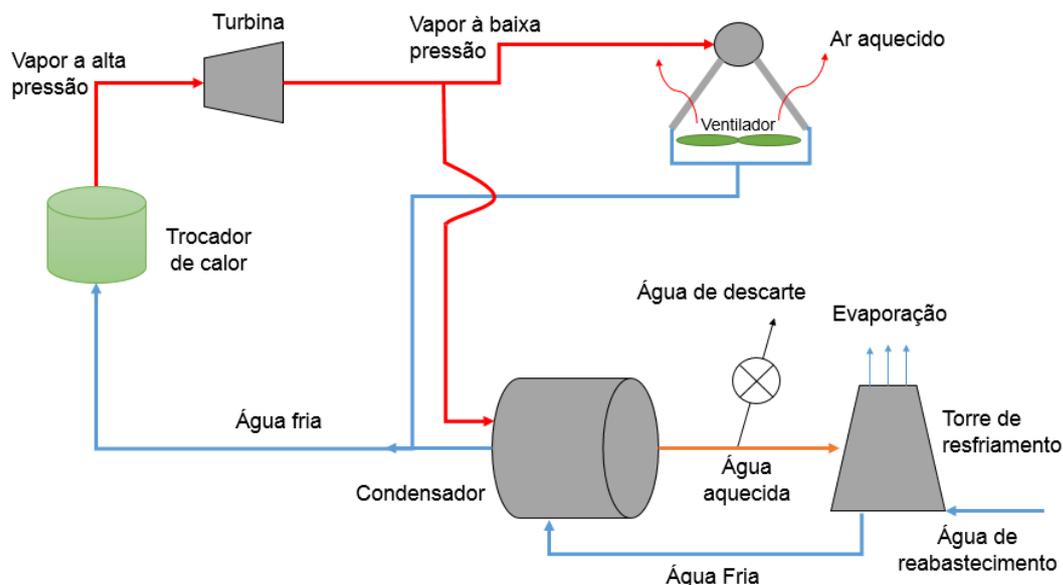


Figura 23- Sistema de resfriamento híbrido. Adaptado de (15).

Em dias quentes, a temperatura do ar está elevada, o que torna a troca de calor entre o ar e o vapor nos sistemas ACC menos eficiente. Com isso, a utilização do sistema WCC em paralelo melhora a performance da turbina, fazendo com que sua eficiência mantenha-se próxima à de projeto. (14) (12)

5.4. CONSUMO DE ÁGUA

O tipo de sistema de resfriamento que existirá na heliotérmica está diretamente ligado à disponibilidade de água. O Quadro 2 mostra o consumo de água em L/MWh nas centrais heliotérmicas, distinguindo o tipo de sistema de resfriamento existente na usina. Observa-se que os sistemas resfriados a água (WCC) consomem maior quantidade de água do que os demais sistemas de resfriamento.

Quadro 2- Consumo de água em heliotérmicas. Adaptado de (17).

Sistema de resfriamento	Tipo de concentrador solar	Volume de água consumida (L/MWh)		
		Médio	Mínimo	Máximo
WCC	Canal Parabólico	3372,8	2744,42	4001,18
	Torre Solar	3028,325	2801,2	3255,45
	Linear Fresnel	3785,41	3785,41	3785,41
ACC	Canal Parabólico	230,91	162,77	299,05
	Torre Solar	98,42	98,42	98,42
Híbrido	Canal Parabólico	851,72	397,47	1305,97
	Torre Solar	643,52	340,69	946,35
-	Disco Parabólico	18,925	15,14	22,71

A heliotérmica do tipo Linear Fresnel é a que consome maior volume de água (3785,41 L/MWh). Nesse tipo de sistema de concentração solar, o fluido de trabalho é a água, que movimenta diretamente a turbina com os vapores gerados pelos concentradores solares, dispensando o uso de trocadores de calor. Além de ser fluido de trabalho, a água também é usada para limpeza e manutenção dos espelhos.

As heliotérmicas que possuem concentradores solares do tipo Disco Parabólico necessitam de água para limpeza e manutenção de espelhos, já que seus motores operam segundo o ciclo Stirling, conforme explicado no Capítulo 4.4 deste trabalho.

O sistema de resfriamento híbrido em heliotérmicas de Torre Solar utiliza de 21% do volume consumido no sistema de resfriamento do tipo WCC. Quando o sistema de resfriamento é do tipo ACC, o volume de água consumido é de apenas 3,24% do volume consumido no sistema WCC.

Nas heliotérmicas de Canal Parabólico, o volume de água consumido no sistema de resfriamento híbrido é 25,25% do volume de água consumido nos sistemas WCC. O sistema do tipo ACC consome 6,84% do volume de água consumido pelo sistema WCC.

6. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO TÉRMICO

Os sistemas de armazenamento térmico contribuem positivamente com a produção de energia em uma central heliotérmica. O armazenamento térmico tem como função produzir energia nas horas que não há luz solar e, também, permitir que haja um despacho mais constante de energia na rede elétrica, inclusive durante o pico de demanda.

Quando se diz que uma central heliotérmica de 300 MW possui 2 horas de armazenamento térmico, significa que a central possui 600 MWh de capacidade de armazenamento.

A evolução dos sistemas de armazenamento térmico permitiu que sua capacidade aumentasse de 1 para 7,5 horas, tempo suficiente para garantir o funcionamento da central heliotérmica durante a noite. (18)

Utilizam-se líquidos com elevada capacidade térmica para os sistemas de armazenamento térmico. Segundo Dienstmann (2009), os nitratos de sais derretidos são ideais para esta aplicação, pois possuem elevada capacidade térmica, são líquidos à pressão atmosférica, são baratos e podem atingir temperaturas de até 6000°C.

É necessário um cuidado especial ao realizar a troca desses fluidos, pois pode ocorrer uma combustão de alguns hidrocarbonetos situados na superfície do sal fundido. Caso esta combustão ocorra, insere-se um gás inerte nestes tanques de armazenamento. (11)

Além dos sais fundidos, pode-se utilizar óleo líquido como fluido de armazenamento térmico. Eles também possuem elevada capacidade térmica e apresentam a vantagem de não apresentar risco de combustão como os sais fundidos.

Ao trocar o sistema de resfriamento do tipo WCC para ACC, há uma redução na eficiência da turbina. Segundo Carter e Campbell (2009), o sistema de armazenamento térmico ajuda a mitigar as perdas quando é efetuada a troca dos sistemas de resfriamento de WCC para ACC.

As heliotérmicas de Torre Solar e de Canal Parabólico utilizam como fluido de trabalho sal fundido e óleo sintético, respectivamente, necessitando de trocadores de calor para geração de vapores, que movimentarão as turbinas.

A Figura 24 mostra o funcionamento dessas heliotérmicas que possuem sistemas de armazenamento térmico e de resfriamento híbrido. O fluido de trabalho é aquecido e direcionado para os tanques de armazenamento térmico. Em seguida trocam calor com a água dentro do trocador de calor.

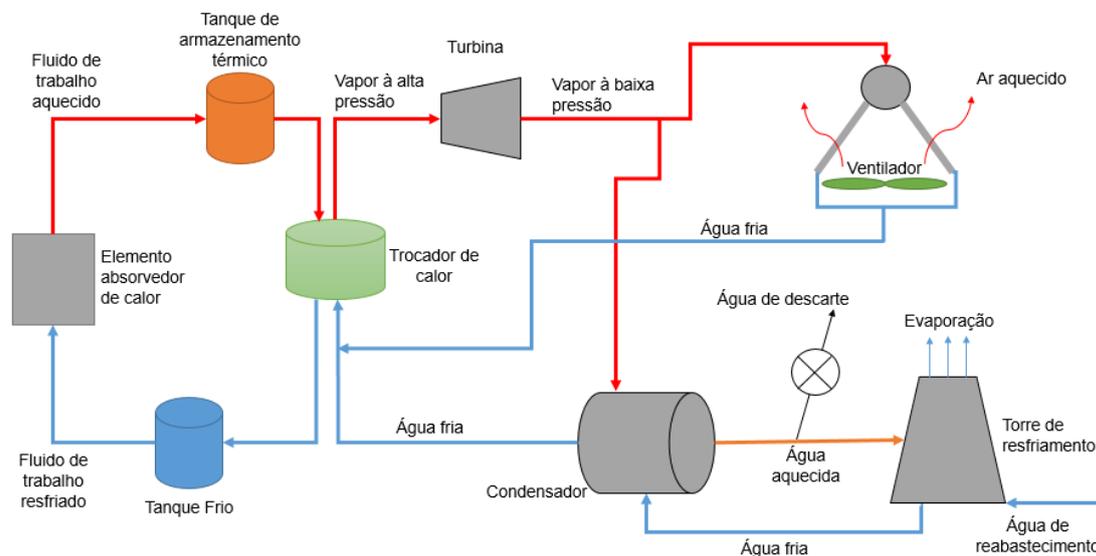


Figura 24- Esquema de funcionamento de uma heliotérmica com armazenamento térmico e sistema de resfriamento híbrido. Fonte: Elaborada pela autora.

O fluido de trabalho é resfriado e a água é evaporada. Esse vapor de água é direcionado para a turbina, que movimenta o conjunto gerador de energia elétrica. Os vapores de saída da turbina são direcionados para o sistema de resfriamento híbrido. Após a condensação, a água fria retorna para o trocador de calor.

7. COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE CONCENTRAÇÃO SOLAR

As tecnologias de concentração solar apresentam diversas vantagens, sendo capazes de atender a diferentes aplicações e condições.

“A principal vantagem da energia elétrica gerada pela tecnologia solar termoeletrica de concentração é o fato de apresentar rendimentos mais elevados em comparação com a tecnologia fotovoltaica, inclusive face à tecnologia fotovoltaica de concentração (*Concentrated Photo Voltaic*, CPV).” (6)

Isso fica evidente quando é feita a análise da capacidade instalada de cada fonte. Observa-se nos dados da Fig. 25 que a capacidade instalada das centrais heliotérmicas (CSP) aumentou significativamente desde o ano de 2006, enquanto as fotovoltaicas de concentração têm uma participação quase inexpressiva.

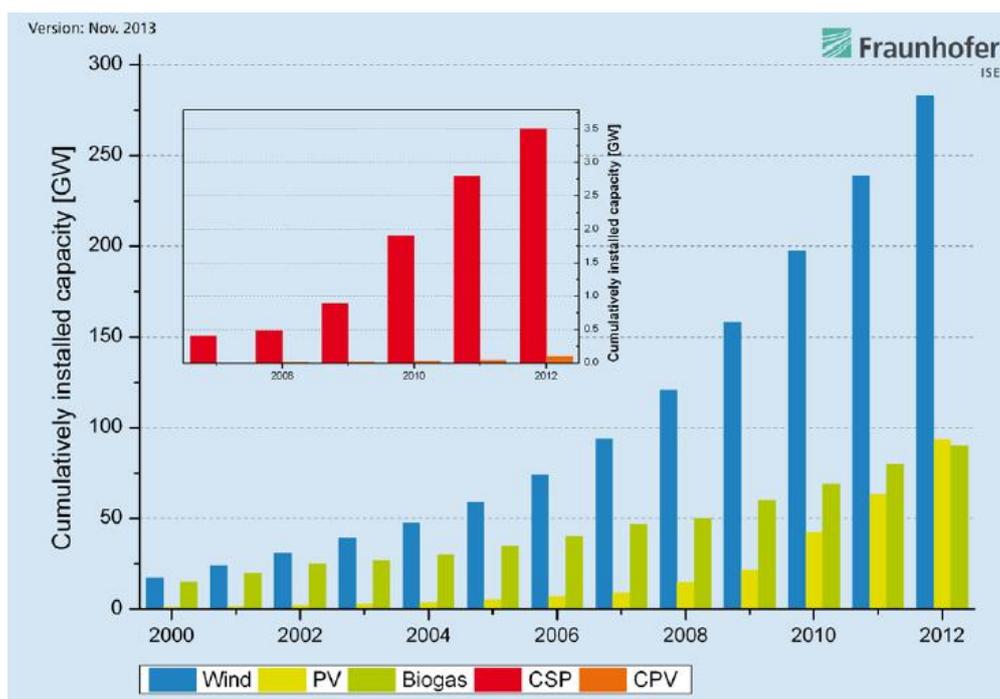


Figura 25- Capacidade instalada cumulativa entre os anos de 2000 e 2012 das centrais eólicas, fotovoltaicas, biogás, heliotérmicas e fotovoltaica de concentração. Fonte (19).

Os sistemas de concentração solar das heliotérmicas ocupam áreas diferentes. Os sistemas de Canal Parabólico ocupam uma área de aproximadamente 38.444 m²/MW, os sistemas de Torre Solar e Disco Parabólico

ocupam cerca de 40.468 m²/MW e os sistemas Linear Fresnel ocupam 19.020 m²/MW. (20)

Quando comparadas com as demais fontes alternativas de geração de energia elétrica, as centrais heliotérmicas apresentam uma capacidade instalada ainda muito baixa. Conforme Greenpeace (2013), podem operar em um sistema híbrido com biomassa ou combustíveis fósseis, garantindo fornecimento de energia estável e flexível sob demanda.

As tecnologias heliotérmicas diferem significativamente umas das outras, não só no que diz respeito aos aspectos técnicos e econômicos, mas também em relação à sua confiabilidade, condições de maturidade e experiência operacional em escalas reais. As heliotérmicas apresentam como desvantagem o alto custo de implementação e manutenção.

Os sistemas de Canal Parabólico são as plantas heliotérmicas mais implantadas comercialmente, mas são esperadas melhorias na sua performance e reduções de custos. É a tecnologia mais madura e apresenta os menores riscos de desenvolvimento. (9)

8. CUSTOS

A análise de custos de uma central heliotérmica abrange o custo do equipamento, custo de instalação, custo operação e manutenção. O custo unitário de produção depende do investimento de capital e da irradiação solar direta normal (DNI).

A grandeza utilizada para definir o custo de produção é o LCOE (*Levelized Cost of Electricity*). Ele é uma avaliação econômica do custo do sistema de geração de energia, incluindo todos os custos ao longo da vida da central heliotérmica. Sua grandeza é expressa geralmente em USD ou EUR por kWh.

O LCOE pode também ser interpretado de uma forma simples, como a tarifa mínima a aplicar à venda da energia elétrica para o projeto se pagar. Acima deste valor o investidor terá teoricamente lucro. (21)

É possível uma redução significativa de custos para as heliotérmicas até 2030, devido ao desenvolvimento da tecnologia em escala comercial no mundo. Os valores do LCOE para a Europa (Fig. 26), quando tem-se um DNI de 2000 kWh/(m²a), podem cair de 0,14 Euro/kWh para aproximadamente 0,08 Euro/kWh. Quando o DNI é de 2500 kWh/(m²a), os valores do LCOE caem de aproximadamente 0,19 Euro/kWh para 0,11 Euro/kWh.

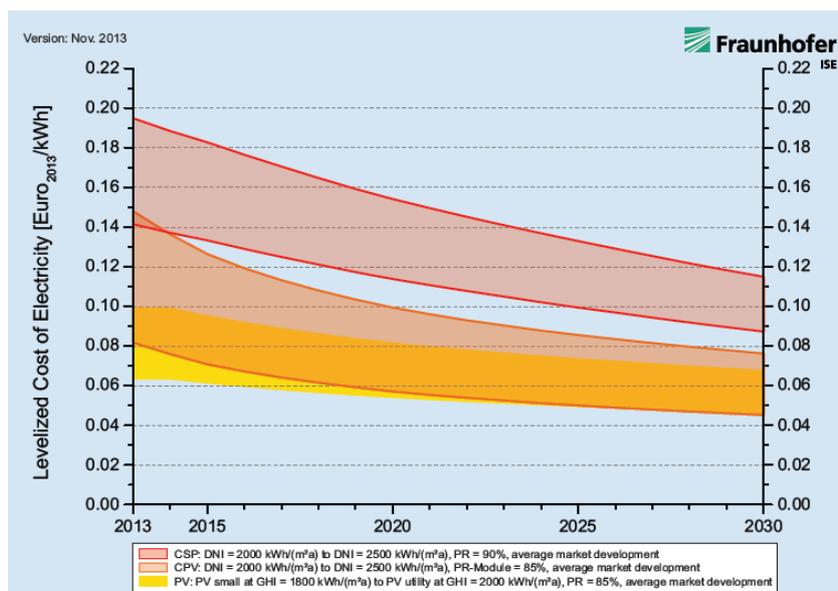


Figura 26- Curva baseada na previsão do LCOE até o ano de 2030 das tecnologias heliotérmicas (CSP), fotovoltaica de concentração (CPV) e fotovoltaica (PV). Fonte: (19).

As centrais heliotérmicas com armazenamento térmico tiveram um LCOE no ano de 2013 que variou entre 0,17 Euro/kWh e 0,195 Euro/kWh quando os valores de irradiação solar direta foram de 2000 kWh/(m²a). Para a irradiação solar direta de 2500 kWh/(m²a), os valores do LCOE variaram de 0,14 Euro/kWh a 0,16 Euro/kWh. [10] As heliotérmicas apresentaram os maiores custos por kWh quando comparadas à fotovoltaica (PV) e à fotovoltaica de concentração (CPV).

Foi feita uma média do valor do Real frente ao Euro no ano de 2013, para posteriormente fazer as conversões dos valores do LCOE de Euro para Real. A tabela referente ao cálculo do valor médio do Real em 2013 encontra-se no Anexo I deste trabalho. O valor médio encontrado foi de R\$ 2,87.

O Quadro 3 mostra a conversão de valores do LCOE de Euro/kWh para Real/kWh, com base no valor médio do Real (Anexo I), para as instalações fotovoltaicas (PV), fotovoltaicas de concentração (CPV) e heliotérmicas (CSP). Os valores de irradiação solar para as instalações fotovoltaicas são referentes à irradiação solar global (GHI), expressas em kWh/m²a. Para as instalações heliotérmicas e fotovoltaicas de concentração, os valores de irradiação solar são referentes à irradiação solar direta normal (DNI).

Quadro 3- Conversão dos valores do LCOE de Euro para Real do ano de 2013. Adaptado de (19).

LCOE (Euro/kWh)		LCOE (Real/kWh)				
Inferior	Superior	Inferior	Superior	Tipo de Instalação		Irradiação
0,097	0,12	0,28	0,34	PV Small 1450	1	GHI em kWh/m ² a
0,078	0,1	0,22	0,29	PV utility 1450	2	
0,079	0,099	0,23	0,28	PV Small 1800	3	
0,065	0,08	0,19	0,23	PV utility 1800	4	
0,075	0,093	0,22	0,27	PV small 2000	5	
0,06	0,075	0,17	0,22	PV utility 2000	6	
0,166	0,193	0,48	0,55	CSP storage 2000	7	DNI em kWh/m ² a
0,141	0,162	0,40	0,46	CSP storage 2500	8	
0,11	0,149	0,32	0,43	CPV 2000	9	
0,081	0,119	0,23	0,34	CPV 2500	10	

O Gráfico 1 mostra a variação dos valores do LCOE (Real/kWh) calculados no Quadro 3. Nota-se que as centrais heliotérmicas com armazenamento térmico tiveram um LCOE no ano de 2013 que variou entre 0,48 Reais/kWh e 0,55 Reais/kWh, quando os valores de irradiação solar direta foram de 2000 kWh/(m²a). Para a irradiação solar direta de 2500 kWh/(m²a), os valores do LCOE variaram de 0,4 Reais/kWh a 0,46 Reais/kWh. As heliotérmicas apresentaram os maiores custos por kWh quando comparadas à fotovoltaica (PV) e à fotovoltaica de concentração (CPV).

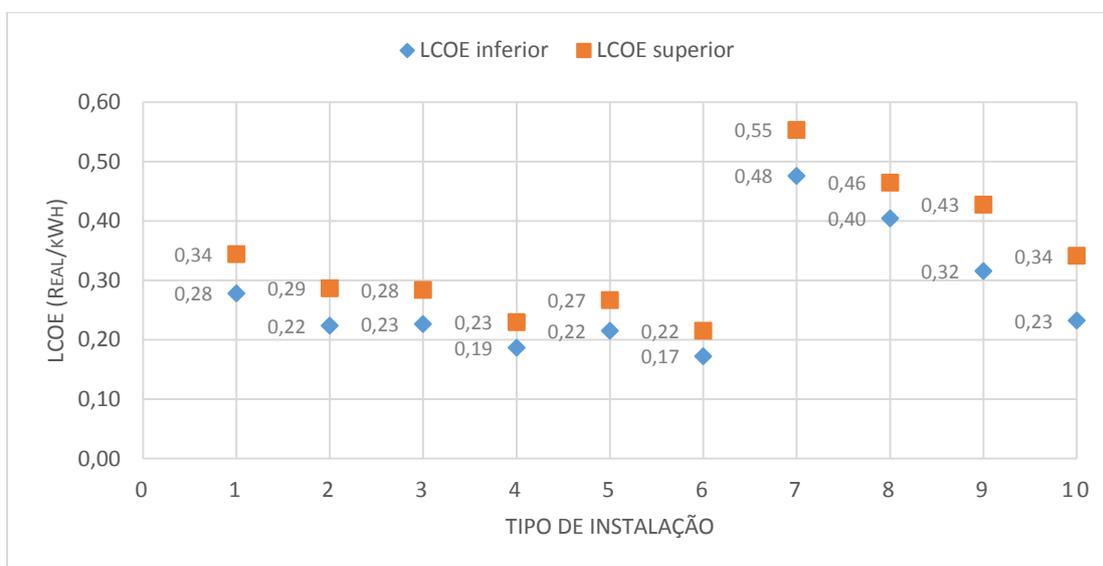


Gráfico 1- Variação do LCOE para centrais fotovoltaicas, fotovoltaicas de concentração e heliotérmicas. Adaptado de (19).

O Quadro 4 mostra a conversão dos valores de LCOE de Euro/kWh para Real/kWh, feitos de forma similar ao Quadro 3, mas refere-se somente as centrais heliotérmicas. As instalações do tipo Disco Parabólico não foram incluídas no quadro comparativo por inexistirem em escala comercial em operação. Os valores do LCOE foram referentes à radiação solar direta normal (DNI) de 2.000 kWh/m²a (instalações de 1 a 4) e de 2.500 kWh/m²a (instalações de 5 a 8).

Quadro 4- Conversão dos valores do LCOE de Euro para Real do ano de 2013 para as centrais heliotérmicas. Adaptado de (19).

LCOE (Euro/kWh)		LCOE (Real/kWh)		Tipo de Instalação		Irradiação
0,16	0,197	0,46	0,56	Canal Parabolico 8h armazenamento	1	2000 kWh/m ² a
0,155	0,25	0,44	0,72	Canal Parabolico sem armazenamento	2	
0,141	0,179	0,40	0,51	Linear Fresnel sem armazenamento	3	
0,185	0,21	0,53	0,60	Torre com 8h armazenamento	4	
0,136	0,169	0,39	0,48	Canal Parabolico 8h armazenamento	5	2500 kWh/m ² a
0,13	0,21	0,37	0,60	Canal Parabolico sem armazenamento	6	
0,121	0,15	0,35	0,43	Linear Fresnel sem armazenamento	7	
0,155	0,175	0,44	0,50	Torre com 8h armazenamento	8	

O Gráfico 2 mostra a variação dos valores do LCOE (Real/kWh) de acordo com o tipo de instalação das centrais heliotérmicas, com base nos dados do Quadro 4. Nota-se que as faixas de variação do LCOE mantiveram uma proporção entre os dois valores analisados de irradiação solar direta. Em ambos os casos observa-se que a presença do armazenamento térmico nos sistemas de Canal Parabólico diminui os custos da eletricidade por kWh.

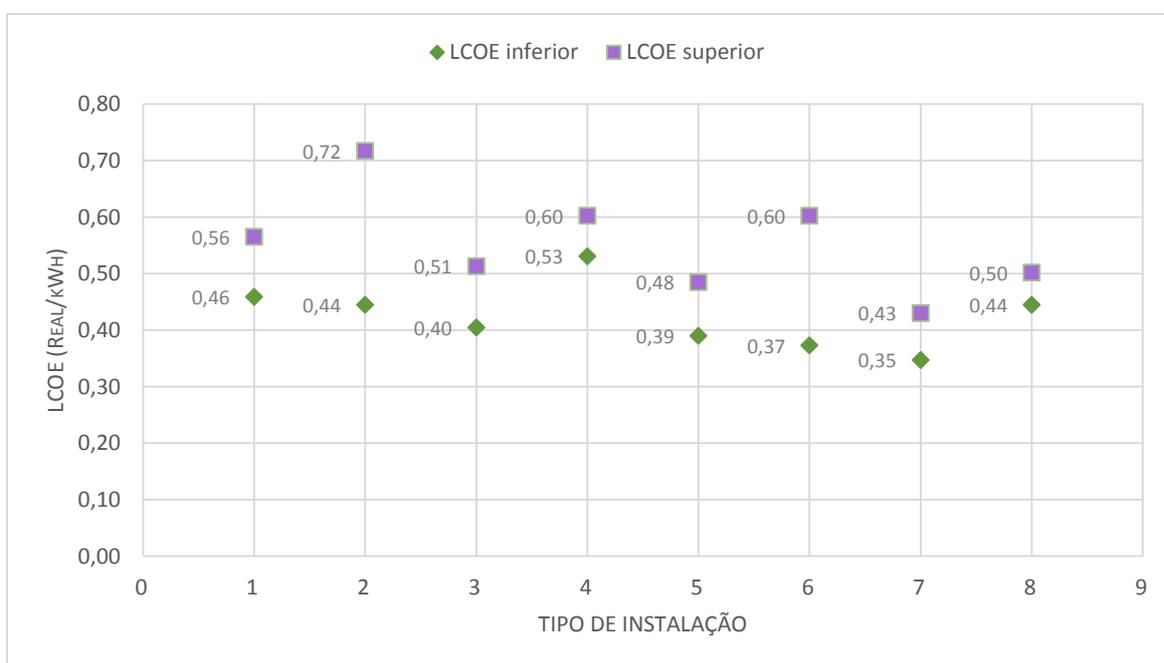


Gráfico 2- Variação do LCOE de centrais heliotérmicas em 2013, com capacidade nominal de 100 MW. Adaptado de (19).

Se comparados os sistemas de Torre Solar e Canal Parabólico, ambos com armazenamento térmico, a Torre Solar apresenta os maiores valores de LCOE, variando de aproximadamente 0,53 Reais/kWh a 0,60 Reais/kWh, quando os valores da irradiação solar direta são de 2.000 kWh/(m²a). Se este valor subir para 2.500 kWh/(m²a), a faixa de variação do LCOE diminui, indo de aproximadamente 0,44 Reais/kWh a 0,50 Reais/kWh.

Essa mesma análise pode ser feita para os sistemas de Canal parabólico com e sem armazenamento térmico e para os sistemas Linear Fresnel com armazenamento térmico. Portanto, o aumento da irradiação solar direta faz com que aumente o potencial das centrais heliotérmicas, diminuindo, assim, o custo da energia elétrica gerada por kWh.

O tipo de sistema de resfriamento dos vapores de saída da turbina também influencia no LCOE. Trocando o sistema de resfriamento do tipo WCC para ACC, há um aumento do LCOE de 3% a 8% em centrais heliotérmicas de Canal Parabólico. O aumento do LCOE na mudança para um sistema de resfriamento híbrido é menor do que o aumento do LCOE na troca dos sistemas WCC para ACC, apesar do sistema de resfriamento híbrido ser mais caro e complexo do que os demais sistemas. (13)

Existem basicamente três formas para reduzir os custos: a primeira é a produção em série dos componentes, o que causa uma queda no custo de fabricação dos mesmos, a segunda é o desenvolvimento tecnológico, o que melhora o desempenho dos componentes e, conseqüentemente, diminui o custo da planta. Por fim, tem-se a terceira possibilidade, que é o ganho de escala. Neste caso, a redução no custo é decorrente de um aumento no tamanho da planta térmica que proporciona uma queda nos custos unitários. (22)

Além disso, incentivos governamentais são fundamentais para a expansão dessas tecnologias em desenvolvimento. O Brasil ainda está dando os primeiros passos no aspecto de legislações para uso e incentivo da energia solar.

A Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, foi aprovada pela Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, e estabelece condições para a regulamentação de mini geração (100 kW a 1 MW) e micro geração (até 100 kW) de energia elétrica, afim de reduzir barreiras para as instalações de geração distribuída de pequeno porte a partir de fonte hidráulica, solar, eólica, biomassa

ou cogeração qualificada. Ela define o Sistema de Compensação de Energia Elétrica como sendo um sistema onde a energia gerada por micro geração e mini geração é cedida à distribuidora e posteriormente compensada nas faturas de consumo local.

Os créditos de energia gerados são válidos por 36 meses. Há ainda a possibilidade do consumidor utilizar esses créditos em outra unidade, desde que as duas unidades consumidoras estejam na mesma área de concessão e sejam do mesmo titular. (7)

9. ESCOLHA DO LOCAL NO CENTRO-OESTE BRASILEIRO PARA A INSTALAÇÃO DE UMA CENTRAL HELIOTÉRMICA

O desenvolvimento de um projeto de uma central heliotérmica abrange diversas áreas, que devem ser analisadas de forma iterativa. Fatores como acesso à rede elétrica, disponibilidade de água, elevados índices de DNI, relevo, acesso a estradas, disponibilidade de combustível e aspectos socioeconômicos são requisitos fundamentais para a determinação de um local de construção de uma usina heliotérmica.

A região Centro-oeste possui valores de DNI que possibilitam o funcionamento de uma central heliotérmica, variando entre 1.900 kWh/m² e 2.100 kWh/m².

Pode-se considerar construir uma central heliotérmica em paralelo com uma termelétrica. Usinas termelétricas podem utilizar a biomassa como combustível. A combustão da biomassa vaporiza a água de caldeiras, que movimentam um conjunto turbina-gerador, produzindo energia elétrica. Os vapores se saída das turbinas são condensados e redirecionados para as caldeiras. O bagaço de cana é um resíduo da produção de açúcar e álcool que é usado como combustível em usinas termelétricas.

A Usina Jalles Machado, localizada em Goianésia-GO, produz açúcar, levedura seca, álcool líquido, álcool gel, álcool anidro e álcool hidratado. O bagaço da cana-de-açúcar é aproveitado na geração de energia elétrica para a usina.

A quantidade de cana-de-açúcar moída na região Centro-sul brasileira (Gráfico 3) cresce a partir dos meses de abril. A maior quantidade de cana-de-açúcar moída da safra 2012/2013 ocorreu nos meses de dezembro a março, assim como na safra 2013/2014 (Anexo II). No mês de abril inicia-se a moagem das novas safras, cuja quantidade de cana-de-açúcar moída é muito inferior à quantidade moída nos meses de dezembro a março.

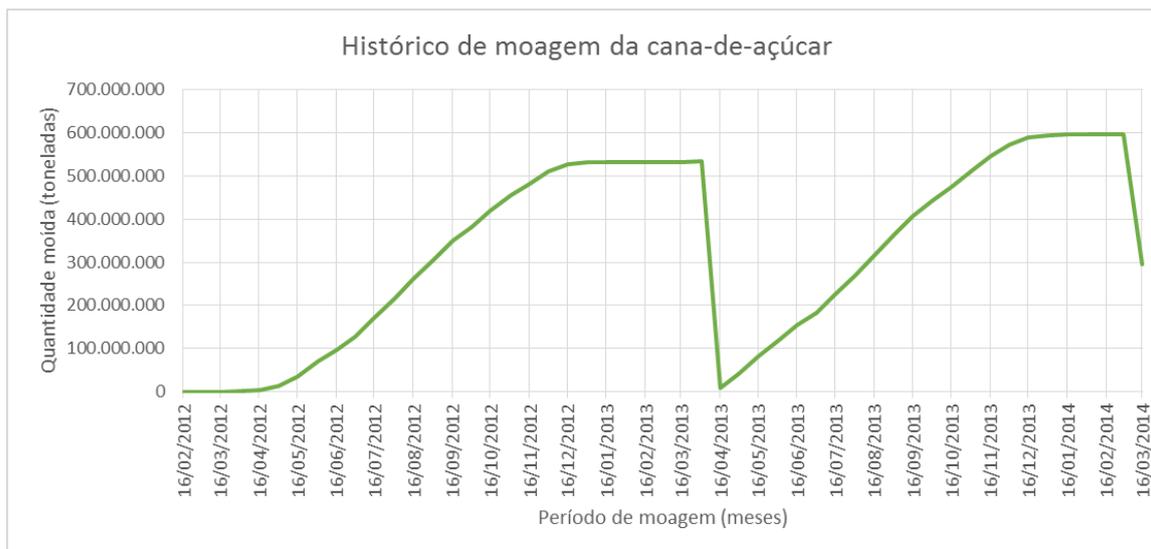


Gráfico 3- Histórico de moagem da cana-de-açúcar na região Centro-Sul brasileira. Adaptado de (23).

O clima da região Centro-oeste é caracterizado por período de estiagem de chuvas que vai de abril a setembro, com pouca nebulosidade durante estes meses. A presença de céu claro nesse período favorece o funcionamento de sistemas que utilizam a energia solar. O período de estiagem no Centro-Oeste, especificamente no estado de Goiás, coincide com o período de baixa moagem de cana-de-açúcar.

A Usina Jalles Machado não gera energia durante 4 meses, que são os períodos caracterizados pela baixa moagem de cana-de-açúcar da usina. Uma central heliotérmica operando em paralelo com a termelétrica de biomassa é capaz de gerar energia nos períodos em que a moagem de cana é insuficiente para o funcionamento da termelétrica.

O Quadro 5 compara as quatro tecnologias de concentração solar existentes. Os sistemas de Torre Solar apresentam as maiores temperaturas de aquecimento do fluido de trabalho, chegando a 2.000°C. Os sistemas de Canal Parabólico e Torre Solar necessitam de um trocador de calor para a geração de vapores, já que os sistemas de concentração solar aquecem óleos sintéticos e sais fundidos, respectivamente.

Quadro 5 - Comparação entre as 4 centrais heliotérmicas existentes.
Fonte: Elaborado pela autora.

	Torre Solar	Canal Parabólico	Linear Fresnel	Disco Parabólico
Temperatura de aquecimento do fluido de trabalho	Até 2.000°C	Até 400°C	Até 300°C	Até 800°C
Fluido aquecido pelos concentradores solares	Sal fundido	Óleo sintético	Água	Hélio ou Hidrogênio
Conjunto gerador de energia	Turbina a vapor	Turbina a vapor	Turbina a vapor	Motor Stirling
Realiza movimento de rastreo solar	Seguido de dois eixos	Seguido de um eixo	Seguido de um eixo	Seguido de dois eixos
Pode ser instalado em relevo acidentado?	Sim	Não	Não	Sim
Sistema de resfriamento	WCC, ACC e Híbrido	WCC, ACC e Híbrido	WCC, ACC e Híbrido	Ar
Área ocupada	40.468 m ² /MW	38.444 m ² /MW	19.020 m ² /MW	40.468 m ² /MW

O sistema de Disco Parabólico é o único que não utiliza uma turbina a vapor. O motor Stirling é resfriado a ar. Os demais sistemas podem ter resfriamento do tipo WCC, ACC ou Híbrido.

Como a disposição dos refletores é feita de forma individual, o sistema de Disco Parabólico pode ser instalado em locais com relevo acidentado, assim como o sistema de Torre Solar. Os refletores da Torre Solar e do Disco Parabólico realizam o rastreamento solar a dois eixos, já os refletores do Canal Parabólico e Linear Fresnel somente a um eixo.

O sistema que ocupa menor espaço é o Linear Fresnel, cerca de 19.020 m²/MW. O sistema de Canal Parabólico ocupa 38.444 m²/MW e os sistemas de Torre Solar e Disco Parabólico ocupam 40.468 m²/MW.

A temperatura dos vapores nas caldeiras da Usina Jalles Machado é de aproximadamente 400°C. As heliotérmicas de canal parabólico aquecem o fluido de trabalho até 400°C. A operação em paralelo de uma heliotérmica de canal parabólico com a termelétrica da Jalles Machado possibilita o uso compartilhado do conjunto turbina-gerador já instalado na usina, reduzindo os custos de implementação da heliotérmica.

Além disso, pode-se intercalar a produção de energia elétrica entre as duas centrais nos períodos de alta moagem, com a heliotérmica de Canal Parabólico produzindo energia elétrica durante o dia e a termelétrica de

biomassa produzindo energia elétrica durante a noite. Essa configuração dispensa o uso de sistemas de armazenamento térmico, contribuindo para a redução de custos.

Em momentos que os valores de irradiação solar direta forem insuficientes para geração de energia elétrica pela heliotérmica, pode-se complementar a geração com o acionamento da termelétrica de biomassa.

O uso dos condensadores de vapor de saída das turbinas também pode ser compartilhado, não havendo necessidade de construção de um novo sistema, que gera aumento do consumo de água nos sistemas de resfriamento durante a operação da usina.

A Figura 27 ilustra o sistema de funcionamento de uma heliotérmica em paralelo com a Usina Jalles Machado.

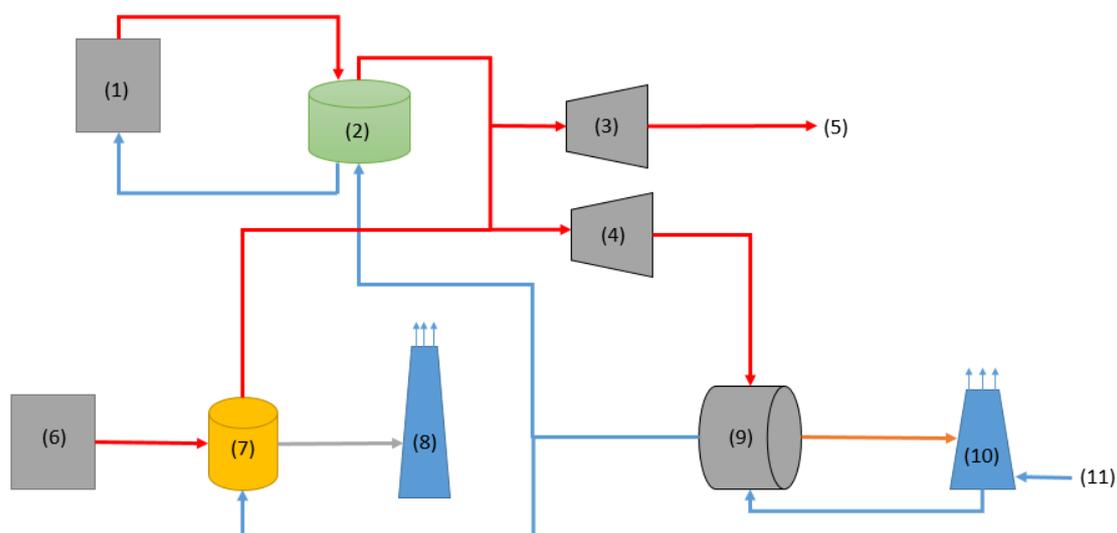


Figura 27- Esquema de funcionamento de uma heliotérmica em paralelo com a Usina Jalles Machado. Fonte: Elaborada pela autora.

O fluido de trabalho é aquecido pelos refletores de canal parabólico (1) e direcionado para o trocador de calor (2), onde calor é transferido do fluido de trabalho para a água. Os vapores gerados no trocador de calor são enviados para a turbina de contrapressão (3) e para a turbina de condensação (4).

A queima do bagaço de cana-de-açúcar (6) vaporiza a água de caldeiras (7) e o vapor é direcionado para as turbinas (3) e (4). Os gases resultantes da queima do bagaço de cana-de-açúcar são direcionados para um sistema de tratamento e são liberados na atmosfera (8).

Os vapores de saída da turbina de contrapressão (3) são redirecionados para outros setores da usina que necessitem de vapor para a produção de açúcar e álcool. Os vapores de saída da turbina de condensação são direcionados para condensador (9).

Após a condensação, a água retorna para as caldeiras (7) e para o trocador de calor (2). A água do condensador passa por uma torre de resfriamento (10) e retorna para o interior do condensador. A torre de resfriamento é periodicamente reabastecida com água (11) para compensar o volume de água evaporado e liberado na atmosfera.

A Figura 28 mostra a vista aérea da Usina Jalles Machado. Grande parte do terreno da Usina é plano e 40 mil hectares são dedicados ao plantio da cana-de-açúcar. O terreno plano permite a construção do sistema de Canal Parabólico.



Figura 28- Foto aérea da Usina Jalles Machado. Fonte: Google, disponível em <<https://www.google.com.br/maps/@-15.2117278,-48.9859363,710m/data=!3m1!1e3>>.

Para a fase de construção da central heliotérmica, é importante que o local seja de fácil acesso. O acesso à Usina é feito principalmente pelas rodovias GO-080, BR-070 e BR-153. A Usina fica à 200 km de distância de Goiânia e 230 km de Brasília. Os aeroportos de Brasília e Goiânia facilitam a chegada de profissionais e equipamentos até à usina.

A construção do acesso à rede elétrica também faz parte do projeto da heliotérmica. A Usina Jalles Machado já está conectada à rede elétrica, o que é uma vantagem, reduzindo novamente os custos de implementação da heliotérmica. A usina tem capacidade instalada de 40MW, quantidade capaz de suprir a demanda da usina de 12MW e o excedente é vendido.

Com o uso compartilhado do conjunto turbina-gerador, consegue-se uma redução dos custos operacionais e de manutenção, visto que a Usina Jalles Machado já dispõe de profissionais qualificados. Os funcionários que já trabalham na Usina podem ser treinados para atuarem nas instalações da heliotérmica, reduzindo o número de novos profissionais a serem contratados.

A proximidade com a cidade de Goianésia (18,8 km) é um fator positivo para a atração de profissionais de outros estados interessados em trabalhar na Usina, já que a cidade fornece toda a infraestrutura necessária como moradia, comércio, serviços bancários, educação, transporte e saúde.

10. CONCLUSÕES

Os períodos de seca afetam diretamente a produção de energia elétrica pelas hidrelétricas. Em períodos críticos, as termelétricas brasileiras têm sua geração de energia elétrica ampliada para suprir a demanda do país. Essa capacidade de geração de energia elétrica pelas termelétricas também pode ser ampliada com a integração das heliotérmicas em seus sistemas.

A implementação de usinas heliotérmicas no Brasil contribui para redução da dependência da geração de energia elétrica pela fonte hidráulica. A heliotérmica utiliza como combustível a energia solar e os seus impactos ambientais são inferiores aos impactos causados pelas usinas hidrelétricas e termelétricas.

A escolha do tipo de tecnologia de concentração solar depende da oferta de água, do relevo da região e dos valores de irradiação solar. Estes fatores influenciam tanto na escolha do sistema de resfriamento quanto na disposição dos refletores solares no terreno.

A construção de uma usina heliotérmica de canal parabólico que opere em paralelo com a usina termelétrica Jalles Machado, localizada em Goianésia-GO, traz benefícios tanto para a termelétrica quanto para a heliotérmica. Essa região possui valores de irradiação solar suficientes para o funcionamento de centrais heliotérmicas, variando entre 1.900 kWh/m² e 2.000 kWh/m².

A escolha do sistema de Canal Parabólico para a heliotérmica permite o uso compartilhado dos sistemas turbina-gerador e dos sistemas de resfriamento, reduzindo os custos de implementação, operação e manutenção da central heliotérmica. O custo com mão de obra qualificada é reduzido, já que os profissionais da termelétrica podem ser treinados para trabalhar nas instalações da heliotérmica.

Os sistemas de armazenamento térmico viabilizam a produção de energia elétrica em períodos que não há luz solar e permitem um despacho constante de energia elétrica na rede. A termelétrica queimará os estoques de bagaço de cana-de-açúcar durante a noite e nos períodos em que os valores de irradiação solar direta forem insuficientes para a geração de energia pela heliotérmica, dispensando o uso dos sistemas de armazenamento térmico.

A Usina Jalles Machado terá sua capacidade de geração de energia elétrica ampliada após a instalação da heliotérmica de Canal Parabólico, já que

será produzida energia elétrica durante os meses de baixa moagem de cana-de-açúcar. Atualmente a Usina Jalles Machado não gera energia elétrica no período de baixa moagem.

Os incentivos governamentais são fundamentais para o desenvolvimento da tecnologia heliotérmica, pois reduzem os riscos do investimento, promovendo maior competitividade e expansão da tecnologia, além de aumentar a oferta de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional.

No Brasil inexitem centrais heliotérmicas. A falta de dados referentes aos custos individuais dos equipamentos das heliotérmicas já construídas em outros países impossibilitou a estimativa dos custos neste trabalho de uma central heliotérmica para operar em paralelo com a Usina Jalles Machado.

A continuidade deste estudo é importante para a viabilização da construção da heliotérmica na Usina Jalles Machado. Caso aconteça, servirá como objeto de estudo para a comunidade acadêmica e estimulará a construção de novas heliotérmicas no Brasil.

11. BIBLIOGRAFIA

1. **MINISTÉRIO DE MINAS ENERGIA, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA.** *Plano Decenal de Expansão de Energia 2022*. Brasília : s.n., 2013.
2. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA.** ABEEólica. [Online] <http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/nosso-setor.html>.
3. **AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA.** Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 2ª Edição Brasília : ANEEL, 2005. p. 243.
4. **SCHLECHT, M. e MEYER, R.** *Site selection and feasibility analysis for concentrating solar power (CSP) systems*. In “*Concentrating solar power technology. Principles, developments and applications*”. Lovegrove, K., Stein, W. (Eds.). 2012.
5. **FILHO, V.C.P.** Análise experimental de um sistema solar com concentrador cilindro parabólico. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)*. s.l., Brasil : Universidade Federal de Santa Catarina., 2013. p. 114.
6. **ALMEIDA, G.S.M.** Pesquisa e Desenvolvimento de um Sistema Termoelétrico do tipo Linear Fresnel Reflector. *Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis)*. s.l., Portugal : Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa., 2013. p. 86.
7. **DUNHAM, M. T. e IVERSON, B. D.** High-efficiency thermodynamic power cycles for concentrated solar power systems. s.l. : Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. Vol. v. 30, pp. p. 758 - 770.
8. **SILVA, R.B.T.** Geração de energia elétrica a partir da concentração solar. *Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica)*. s.l. : Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista., 2011. p. 47.
9. **INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY.** Renewable Energy Technologies: Cost analysis series-Concentrating Solar Power. s.l. : IRENA, 2012.
10. **BURGI, A.S.** Avaliação do potencial técnico de geração elétrica termossolar no Brasil a partir de modelagem em SIG e simulação de plantas virtuais. *Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético)*. s.l. : Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. p. 157 f.
11. **DIENSTMANN, G.** Energia Solar: Uma comparação de tecnologias. *Dissertação (graduação em Engenharia Elétrica)*. s.l. : Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul., 2009. p. 92 f.
12. **POULLIKKAS, A., HADJIPASCHALIS, I. e KOURTIS, G.** *A comparative overview of wet and dry cooling systems for Rankine cycle based CSP plants*. s.l. : Trends in Heat and Mass Transfer, 2013.
13. **TURCHI, C.S., WAGNER, M.J. e KUTSCHER, C.F.** Water Use in Parabolic Trough Power Plants: Summary Results from WorleyParsons' Analyses. *Technical Report*. s.l. : U.S. Department of Energy, 2010.
14. **CARTER, N. T. e CAMPBELL, R. J.** Water Issues of Concentrating Solar Power (CSP) Electricity in the U.S. Southwest. s.l. : Congressional Research Service, 2009.
15. **U.S. DEPARTMENT OF ENERGY.** Concentrating Solar Power Commercial Application Study: Reducing water consumption of concentrating solar power electricity generation. *Report to Congress*.
16. **ÇENGEL, Y. A. e BOLES, M. A.** *Thermodynamics An Engineering Approach*. 5ª. s.l. : McGraw-Hill Science, 2004.
17. **MACKNICK, J., et al.** A Review of Operational Water Consumption and Withdrawal Factors for Electricity Generating Technologies. s.l. : NREL, 2011.
18. **GREENPEACE.** Revolução energética: A caminho do desenvolvimento limpo. 2013.
19. **KOST, C. et al.** Levelized Cost of Electricity: Renewable Energy Technologies. 2013. p. 50 f.
20. **ONG, S., et al.** Land-Use Requirements for Solar Power Plants in the United States. s.l. : NREL, 2013.

21. **SILVA, M.A.P.** Central de produção de energia elétrica a partir de energia solar térmica. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)*. s.l. : Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2014. p. 92 f.
22. **TAVARES, R.F.A.M.** Geração Heliotérmica: Avaliação do impacto da utilização de novos fluidos no custo da energia gerada. *Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro*. 2014.
23. **UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR**. Relatório final da safra 2013/2014: Região Centro-Sul. s.l. : UNICA, 2014.
24. **LOPES, J.T.** Dimensionamento e Análise Térmica de um Dessalinizador Solar Híbrido. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)*. s.l., Brasil : Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas., 2004. p. 109.
25. **BIANCHINI, H M.** Avaliação comparativa de sistemas de energia solar térmica. *Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica)*. s.l. : Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. p. 71 f.
26. **TURCHI, C. S. e KUTSCHER, C. F.** Water Use in Parabolic Through Power Plants: Summary results from WorleyParson's analyses. *Technical Report*. s.l. : NREL, 2010.

12. ANEXOS

Anexo I- Tabela de variação do Real frente ao Euro do ano de 2013. Fonte: Banco Central. Elaborada pela autora.

VALOR DO REAL DO ANO DE 2013												
Dias	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1	R\$ 2,70640	R\$ 2,69810	R\$ 2,57710	R\$ 2,59530	R\$ 2,63640	R\$ 2,76760	R\$ 2,91220	R\$ 3,02850	R\$ 3,13108	R\$ 2,99480	R\$ 3,03390	R\$ 3,16260
2	R\$ 2,70640	R\$ 2,69810	R\$ 2,57710	R\$ 2,59040	R\$ 2,62580	R\$ 2,76760	R\$ 2,91740	R\$ 3,04320	R\$ 3,11870	R\$ 3,00240	R\$ 3,03390	R\$ 3,17380
3	R\$ 2,68120	R\$ 2,69810	R\$ 2,57710	R\$ 2,60010	R\$ 2,63480	R\$ 2,79640	R\$ 2,94360	R\$ 3,04320	R\$ 3,14600	R\$ 3,01900	R\$ 3,03390	R\$ 3,19940
4	R\$ 2,66790	R\$ 2,69990	R\$ 2,57950	R\$ 2,59660	R\$ 2,63480	R\$ 2,78240	R\$ 2,91880	R\$ 3,04320	R\$ 3,11030	R\$ 2,99540	R\$ 3,02980	R\$ 3,21840
5	R\$ 2,66790	R\$ 2,69050	R\$ 2,56520	R\$ 2,61020	R\$ 2,63480	R\$ 2,77940	R\$ 2,90560	R\$ 3,05040	R\$ 3,05880	R\$ 2,99540	R\$ 3,06270	R\$ 3,23960
6	R\$ 2,65190	R\$ 2,69050	R\$ 2,55750	R\$ 2,61020	R\$ 2,63210	R\$ 2,81520	R\$ 2,90560	R\$ 3,05160	R\$ 3,02560	R\$ 2,99540	R\$ 3,08530	R\$ 3,21750
7	R\$ 2,65480	R\$ 2,68950	R\$ 2,56980	R\$ 2,61020	R\$ 2,63120	R\$ 2,82940	R\$ 2,90560	R\$ 3,06920	R\$ 3,02560	R\$ 2,99700	R\$ 3,05120	R\$ 3,21750
8	R\$ 2,66400	R\$ 2,68950	R\$ 2,53470	R\$ 2,58890	R\$ 2,63980	R\$ 2,82940	R\$ 2,90510	R\$ 3,06410	R\$ 3,02560	R\$ 2,99040	R\$ 3,09410	R\$ 3,18790
9	R\$ 2,68480	R\$ 2,68950	R\$ 2,53470	R\$ 2,60060	R\$ 2,62790	R\$ 2,82940	R\$ 2,89070	R\$ 3,03440	R\$ 3,03210	R\$ 2,98020	R\$ 3,09410	R\$ 3,18510
10	R\$ 2,71370	R\$ 2,68950	R\$ 2,53470	R\$ 2,58700	R\$ 2,62090	R\$ 2,82940	R\$ 2,91610	R\$ 3,03440	R\$ 3,02070	R\$ 2,95760	R\$ 3,09410	R\$ 3,20740
11	R\$ 2,71370	R\$ 2,68950	R\$ 2,54900	R\$ 2,59020	R\$ 2,62090	R\$ 2,85780	R\$ 2,95850	R\$ 3,03440	R\$ 3,05200	R\$ 2,95890	R\$ 3,10200	R\$ 3,21530
12	R\$ 2,71370	R\$ 2,64560	R\$ 2,55020	R\$ 2,58730	R\$ 2,62090	R\$ 2,86099	R\$ 2,95800	R\$ 3,02500	R\$ 3,03170	R\$ 2,95890	R\$ 3,14240	R\$ 3,20390
13	R\$ 2,71540	R\$ 2,62380	R\$ 2,55390	R\$ 2,58730	R\$ 2,61570	R\$ 2,85550	R\$ 2,95800	R\$ 3,05120	R\$ 3,02560	R\$ 2,95890	R\$ 3,11450	R\$ 3,20390
14	R\$ 2,71630	R\$ 2,61580	R\$ 2,58040	R\$ 2,58850	R\$ 2,60200	R\$ 2,84780	R\$ 2,95800	R\$ 3,06450	R\$ 3,02560	R\$ 2,96320	R\$ 3,13350	R\$ 3,20390
15	R\$ 2,70910	R\$ 2,61580	R\$ 2,58040	R\$ 2,61490	R\$ 2,60220	R\$ 2,84780	R\$ 2,94000	R\$ 3,10880	R\$ 3,02560	R\$ 2,94410	R\$ 3,13350	R\$ 3,20390
16	R\$ 2,72360	R\$ 2,61580	R\$ 2,58040	R\$ 2,60220	R\$ 2,61260	R\$ 2,84780	R\$ 2,93790	R\$ 3,13960	R\$ 3,02340	R\$ 2,91820	R\$ 3,13350	R\$ 3,19990
17	R\$ 2,72320	R\$ 2,62710	R\$ 2,57510	R\$ 2,63530	R\$ 2,60920	R\$ 2,87320	R\$ 2,92940	R\$ 3,13960	R\$ 3,02100	R\$ 2,95270	R\$ 3,13350	R\$ 3,18940
18	R\$ 2,72320	R\$ 2,61760	R\$ 2,55500	R\$ 2,62480	R\$ 2,60920	R\$ 2,90990	R\$ 2,91600	R\$ 3,13960	R\$ 3,00250	R\$ 2,96010	R\$ 3,09020	R\$ 3,20410
19	R\$ 2,72320	R\$ 2,61670	R\$ 2,57290	R\$ 2,62480	R\$ 2,61580	R\$ 2,91430	R\$ 2,93910	R\$ 3,20090	R\$ 2,98100	R\$ 2,96010	R\$ 3,07550	R\$ 3,25720
20	R\$ 2,71810	R\$ 2,60780	R\$ 2,57610	R\$ 2,62480	R\$ 2,63410	R\$ 2,97660	R\$ 2,93910	R\$ 3,21460	R\$ 2,98270	R\$ 2,97290	R\$ 3,10460	R\$ 3,25720
21	R\$ 2,72550	R\$ 2,59636	R\$ 2,61580	R\$ 2,63070	R\$ 2,62280	R\$ 2,97010	R\$ 2,93910	R\$ 3,23120	R\$ 2,98270	R\$ 2,99720	R\$ 3,10100	R\$ 3,25720
22	R\$ 2,71950	R\$ 2,59636	R\$ 2,61580	R\$ 2,62450	R\$ 2,65710	R\$ 2,97010	R\$ 2,94240	R\$ 2,26820	R\$ 2,97340	R\$ 3,00830	R\$ 3,10100	R\$ 3,24750
23	R\$ 2,71490	R\$ 2,59636	R\$ 2,61580	R\$ 2,63110	R\$ 2,64770	R\$ 2,97010	R\$ 2,95620	R\$ 3,19610	R\$ 2,97180	R\$ 3,03710	R\$ 3,10100	R\$ 3,22340
24	R\$ 2,73320	R\$ 2,59636	R\$ 2,59500	R\$ 2,61650	R\$ 2,64770	R\$ 2,90200	R\$ 2,97730	R\$ 3,19610	R\$ 3,00820	R\$ 3,01370	R\$ 3,08920	R\$ 3,22340
25	R\$ 2,73320	R\$ 2,59040	R\$ 2,58280	R\$ 2,60490	R\$ 2,64770	R\$ 2,85810	R\$ 2,98510	R\$ 3,16910	R\$ 3,00540	R\$ 3,01370	R\$ 3,11590	R\$ 3,21760
26	R\$ 2,73320	R\$ 2,59630	R\$ 2,58000	R\$ 2,60490	R\$ 2,65510	R\$ 2,84370	R\$ 2,98510	R\$ 3,21260	R\$ 3,05570	R\$ 3,01370	R\$ 3,13150	R\$ 3,24850
27	R\$ 2,72610	R\$ 2,58320	R\$ 2,58530	R\$ 2,60490	R\$ 2,65350	R\$ 2,88270	R\$ 2,98510	R\$ 3,13410	R\$ 3,05570	R\$ 3,01230	R\$ 3,15770	R\$ 3,24850
28	R\$ 2,68470	-	R\$ 2,58530	R\$ 2,61790	R\$ 2,71430	R\$ 2,88270	R\$ 2,98986	R\$ 3,11910	R\$ 3,05570	R\$ 3,01000	R\$ 3,16260	R\$ 3,24850
29	R\$ 2,69660	-	R\$ 2,58530	R\$ 2,63640	R\$ 2,71430	R\$ 2,88270	R\$ 3,01630	R\$ 3,13108	R\$ 3,01810	R\$ 3,01310	R\$ 3,16260	R\$ 3,23190
30	R\$ 2,69870	-	-	-	R\$ 2,76760	-	R\$ 3,04520	R\$ 3,13108	-	R\$ 2,99950	-	R\$ 3,22650
média	R\$ 2,70361	R\$ 2,64477	R\$ 2,57275	R\$ 2,60762	R\$ 2,63865	R\$ 2,86426	R\$ 2,94641	R\$ 3,10136	R\$ 3,03250	R\$ 2,98562	R\$ 3,09860	R\$ 3,21775

Anexo II - Histórico da moagem quinzenal acumulada da região Centro-Sul.
Fonte: (23).

Quinzena	CANA-DE-AÇÚCAR (toneladas)								
	São Paulo			Centro-Sul			Demais Estados		
	2012/2013	2013/2014	Var. (%)	2012/2013	2013/2014	Var. (%)	2012/2013	2013/2014	Var. (%)
16/02	0	0		62.407	0		62.407	0	
01/03	0	0		145.523	0		145.523	0	
16/03	0	83.427	0%	268.902	189.063	-30%	268.902	105.636	-51%
01/04	104.322	929.297	791%	533.847	1.840.562	245%	429.525	911.265	112%
16/04	2.130.641	6.143.937	188%	4.736.769	9.573.279	102%	2.606.128	3.429.342	32%
01/05	6.753.397	26.582.398	294%	14.133.076	41.715.627	195%	7.379.679	15.133.229	105%
16/05	18.078.715	52.951.373	193%	35.014.193	82.138.063	135%	16.935.478	29.186.690	72%
01/06	40.950.372	74.439.279	82%	70.798.058	117.681.757	66%	29.847.686	43.242.478	45%
16/06	55.094.486	95.769.497	74%	96.674.881	153.333.465	59%	41.580.395	57.563.968	38%
01/07	73.838.517	113.832.267	54%	128.377.825	182.738.268	42%	54.539.308	68.906.001	26%
16/07	100.037.254	140.047.880	40%	170.572.914	225.731.010	32%	70.535.660	85.683.130	21%
01/08	128.355.725	166.707.368	30%	216.850.039	270.163.489	25%	88.494.314	103.456.091	17%
16/08	155.949.298	194.863.040	25%	261.096.423	316.635.285	21%	105.147.125	121.772.245	16%
01/09	185.033.425	224.574.908	21%	307.615.408	365.444.859	19%	122.581.983	140.869.951	15%
16/09	211.142.346	251.390.113	19%	349.583.250	408.543.259	17%	138.440.904	157.153.146	14%
01/10	229.995.069	271.293.528	18%	381.351.364	442.613.956	16%	151.356.295	171.320.428	13%
16/10	254.509.209	289.850.058	14%	419.347.426	473.902.542	13%	164.838.217	184.052.484	12%
01/11	277.010.496	314.410.424	14%	455.494.097	512.841.085	13%	178.483.601	198.430.661	11%
16/11	294.955.779	334.701.570	13%	481.986.144	545.155.064	13%	187.030.365	210.453.494	13%
01/12	314.572.839	350.855.713	12%	510.593.620	571.197.780	12%	196.020.781	220.342.067	12%
16/12	327.137.555	362.238.753	11%	528.155.576	589.268.333	12%	201.018.021	227.029.580	13%
01/01	329.070.599	366.337.618	11%	531.311.133	595.006.866	12%	202.240.534	228.669.248	13%
16/01	329.432.882	366.719.522	11%	531.853.466	595.666.359	12%	202.420.584	228.946.837	13%
01/02	329.652.510	366.862.753	11%	532.260.252	595.977.140	12%	202.607.742	229.114.387	13%
16/02	329.674.913	366.882.077	11%	532.415.545	596.126.411	12%	202.740.632	229.244.334	13%
01/03	329.775.007	366.882.077	11%	532.551.581	596.180.762	12%	202.776.574	229.298.685	13%
16/03	329.830.906	366.918.034	11%	532.607.480	596.281.589	12%	202.776.574	229.363.555	13%
01/04	329.922.736	367.449.592	11%	532.758.260	597.061.188	12%	202.835.524	229.611.596	13%