

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS MILLER OLIVEIRA SANTOS

ESTUDO DE FLUIDOS TÉRMICOS APLICADOS À ENERGIA
TERMOSSOLAR

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2019

LUCAS MILLER OLIVEIRA SANTOS

**ESTUDO DE FLUIDOS TÉRMICOS APLICADOS À ENERGIA
TERMOSSOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Cornélio Procópio, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Gabriela Helena Bauab Shiguemoto

CORNÉLIO PROCÓPIO

2019



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucas Miller Oliveira Santos

Estudo de fluidos térmicos aplicados à energia termossolar

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 12:00hs do dia 19/06/2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Gabriela Helena Bauab Shiguemoto - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Joyce Maria Cordeiro Cruz - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Cássio Henrique dos Santos Amador - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Carla Fabiana Cerqueira Machado - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Existem notáveis similaridades entre a energia solar e a tecnologia de aviação. A poucos anos atrás, se alguém investisse uma boa quantia de dinheiro na aviação poderia ser chamado de lunático. Mas agora, todos sabem que realmente é possível voar, e todos querem investir. A cada mês são alcançados grandes avanços na aviação. A tecnologia solar terá a mesma história de sucesso. Frank Schuman (1912).

RESUMO

SANTOS, Lucas Miller Oliveira. ESTUDO DE FLUIDOS TÉRMICOS APLICADOS À ENERGIA TERMOSSOLAR. 44 f. TCC (Curso de Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

A matriz elétrica brasileira está sendo diversificada devido ao esgotamento do potencial de geração hidrelétrica, uma fonte que foi responsável por mais de 80% do Sistema Interligado Nacional (SIN). O principal reflexo dessa diversificação é a geração eólica, que dobrou sua participação na última década, e a energia solar, que tem se mostrado uma opção vantajosa devido aos altos níveis de irradiação solar em quase todo o território brasileiro. Para conversão de energia solar em energia elétrica existem dois princípios, a conversão direta, e a indireta que acontece através da Concentração Solar - CSP, tecnologia estudada nesta monografia. A tecnologia CSP não é considerada desenvolvida no Brasil, embora já seja considerada madura internacionalmente. Uma de suas principais vantagens está relacionada à sua capacidade de armazenamento de calor, o que permite que este sistema produza eletricidade mesmo em horários sem luz solar. Isso devido o calor que é armazenado em fluidos térmicos, que serão abordados nesta monografia para apresentar quais são os mais utilizados e quais as suas vantagens e desvantagens. Também será apresentado um estudo sobre os impactos ambientais e o ciclo de vida de uma usina CSP.

Palavras-chave: Ciclo de vida; Concentração solar; Energia Solar; Fluidos de Transferência Térmica.

ABSTRACT

SANTOS, Lucas Miller Oliveira. STUDY OF THERMAL FLUIDS APPLIED TO CONCENTRATING SOLAR POWER. 44 f. TCC (Course of Electrical engineering) - Federal University of Technology - Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

The Brazilian electricity matrix is being diversified due to the depletion of hydroelectric generation potential, a source that was responsible for more than 80% of the National Interconnected System (SIN). The main reflection of this diversification is wind generation, which has doubled its participation in the last decade, and solar energy, which has proven to be an advantageous option due to the high levels of solar irradiation in almost all of Brazil. For conversion of solar energy into electrical energy there are two principles, the direct and indirect conversion that happens through Concentrating Solar Power - CSP, technology studied in this monograph. CSP technology is not considered developed in Brazil, although it is already considered mature internationally. One of its main advantages is related to its heat storage capacity, which allows this system to generate electricity even at times without sunlight. Heat is stored in thermal fluids, which will be addressed in this monograph to show which are the most used and what are their advantages and disadvantages. A study will also be presented on the environmental impacts and life cycle of a CSP plant.

Keywords: Concentrating Solar Power; Heat Transfer Fluid; Life cycle; Solar energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Participação de energias renováveis na Matriz Energética brasileira	12
Figura 2 – Prensa tipográfica de August Mouchet operada por coletor solar parabólico.....	16
Figura 3 – Estação de bombeamento de águas do rio Nilo em Al Meadi, 1913	17
Figura 4 – Evolução do preço do barril de petróleo em dólares americanos – USD	18
Figura 5 – Central Solar Two	19
Figura 6 – Centrais de Concentração Solar na Espanha.....	20
Figura 7 – Centrais de Geração Elétrica por Concentração Solar no Mundo - em potência instalada.....	21
Figura 8 – Diagrama do processo de geração elétrica por Concentração Solar	22
Figura 9 – Radiação solar direta refletida no coletor	23
Figura 10 – Sistema de rastreamento solar.....	23
Figura 11 – Tubo receptor cilindro parabólico	24
Figura 12 – Refletor linear Fresnel.....	25
Figura 13 – Tubo receptor linear Fresnel em campo solar	25
Figura 14 – Estrutura do disco parabólico.....	26
Figura 15 – Motor Stirling.....	27
Figura 16 – Sistema de rastreamento solar.....	27
Figura 17 – Campo de heliostatos em sistema torre solar	28
Figura 18 – Campo solar norte e Campo solar circular.....	29
Figura 19 – Faixa de temperatura de trabalho do óleo Therminol ® VP-1	31
Figura 20 – Sistema armazenador de calor TES	32
Figura 21 – Sistema armazenador de calor – TES direto	33
Figura 22 – Emissões de CO ₂ em diferentes tecnologias de energia elétrica.....	34
Figura 23 – Composição dos materiais usados na construção de Usina CSP Torre Solar 1MW	35
Figura 24 – Distribuição da energia usada nos processos de desenvolvimento de Usina CSP 1MW.....	35
Figura 25 – Comparação de níveis de impacto normalizado	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução da Matriz de Energia Elétrica 2017/2021.....	13
Tabela 2 – Uso total de energia para produção de material de Usina CSP 1MW.....	36
Tabela 3 – Composição de 1kg de fluido térmico CSP	36

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

CSP	Concentrating Solar Power – Concentração Solar
CVU	Custo Variável Unitário
Eletrobrás	Centrais Elétricas Brasileiras
Eletrosul	Centrais Elétricas do Sul do Brasil
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PEN	Plano de Operação Energética
SIN	Sistema Interligado Nacional
UHE	Usina Hidroelétrica
GEE	Gases de Efeito Estufa
HTF	Heat Transfer Fluid – Flúidos de Transferência Térmica
TES	Thermal Energy Storage – Armazenador de Calor

LISTA DE SÍMBOLOS

W/m ²	Watt por metro quadrado
Wh	Watt hora
MW	Mega Watt ($10^6 \times Watt$)
cv	Cavalo vapor ($1cv = 735,4987 W$)
US\$	Dólares americanos
°C	Graus Celsius

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	11
1.2 PROBLEMAS E JUSTIFICATIVAS	11
1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	14
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 GERAL.....	15
2.2 ESPECÍFICOS	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
3.1 BREVE HISTÓRIA DA GERAÇÃO ELÉTRICA POR CONCENTRAÇÃO SOLAR	16
3.2 TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO POR CONCENTRAÇÃO SOLAR.....	20
3.2.1 REFLETORES CILÍNDRICOS PARABÓLICOS	22
3.2.2 REFLETORES LINEARES FRESNEL	24
3.2.3 DISCOS PARABÓLICOS	26
3.2.4 SISTEMA DE RECEPTOR CENTRAL.....	28
4 ESTUDO DE CASO	30
4.1 FLUIDOS DE TRANFERÊNCIA TÉRMICA – HTF.....	30
4.1.1 ÓLEO SINTÉTICO COMO HTF.....	31
4.2 ARMAZENADOR DE CALOR – TES	32
4.3 CICLO DE VIDA DE UMA USINA CSP.....	33
4.3.1 ÓLEOS E SAIS HTF E TES.....	36
5 CONCLUSÃO.....	38
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho de conclusão de curso será apresentado um estudo das tecnologias usadas na geração elétrica por concentração solar, evidenciando os armazenadores de calor e fluídos térmicos usados em cada modelo.

A essência da grande maioria da energia consumida pelo homem é o sol. Os combustíveis de origem fóssil, como carvão e petróleo foram originalmente resíduos de plantas e animais, que obtiveram sua energia da radiação do sol, por exemplo. De forma parecida, o sol também exerce controle sobre as energias de fontes hídricas e eólicas controlando os ciclos das águas e dos ventos (EUSTÁQUIO, 2011).

É indiscutível a importância fundamental do Sol enquanto fonte de energia, não somente, desconsiderando sua influência nas fontes de energia já mencionadas, o Sol sozinho fornece o equivalente a 10 mil vezes o consumo mundial de energia em um ano (EUSTÁQUIO, 2011), mas toda essa energia é entregue à atmosfera terrestre na forma de radiação solar, e nem toda ela consegue ser absorvida pela atmosfera, e para chegar à rede elétrica precisa antes ser convertida.

Apesar de chegar gratuitamente à atmosfera terrestre, os processos de conversão da radiação solar em energia elétrica apresentam custo relativo elevado em comparação com outras fontes (CASTRO, 2015), o que se deve a três fatores em especial: a baixa densidade com que essa energia chega à atmosfera (W/m^2); ao fato das maiores quantidades de energia estarem concentradas em regiões remotas, e a sua intermitência, que se deve a nuvens e, obviamente, à noite (EUSTÁQUIO, 2011).

Estes processos estão divididos em dois grupos de acordo com a tecnologia empregada na conversão da radiação solar em energia elétrica, que podem ser por processos fotovoltaicos e por concentração solar. A geração fotovoltaica é a mais comum, e ocorre quando a radiação solar incide diretamente sobre um material semicondutor, normalmente o silício, produzindo tensão elétrica (CARVALHO, 2016). Esse processo converte a radiação solar diretamente em energia elétrica, diferente da concentração solar.

Na concentração solar os raios solares são focados de forma a transformá-los em calor. Esse calor é então transferido para uma máquina térmica, que o converte em energia elétrica. Um processo indireto, com diferenças bastante acentuadas em relação à fotovoltaica, não somente nesse aspecto, mas também na parte tecnológica, no emprego de materiais e tecnologias utilizadas, e no perfil da geração, que na concentração solar podem existir sistemas de armazenamento de calor, o que permitiria que a unidade geradora tivesse controle

sobre sua geração, e com isso cumprir com os requisitos de reserva primária e secundária do sistema elétrico (CASTRO, 2015), o que não ocorre com a fotovoltaica.

O armazenamento de calor da concentração solar ocorre geralmente através de fluidos térmicos, que serão abordados neste trabalho, que traz a discussão à tecnologia de geração elétrica por Concentração Solar, que no Brasil também é chamada de heliotérmica e termossolar, e que tem ganhado espaço no cenário nacional, tendo inclusive previsão de implantação de uma Central de Concentração Solar no Estado de Santa Catarina em 2020 pela Eletrosul (ELETROSUL, 2018), estatal brasileira ligada a Eletrobrás.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este projeto de trabalho de conclusão de curso delimitou-se em identificar as diferentes tecnologias empregadas na geração elétrica por concentração solar, de modo a construir um estudo que sirva de base para compreensão do princípio de funcionamento de cada modelo dessa geração, e como ocorre a concentração solar e o armazenamento de calor, de modo a caracterizar o objeto desta pesquisa, que são os fluidos térmicos: sais fundidos e óleos térmicos, no que se relacionam a sua escolha e manejo, evidenciando seu ciclo de vida.

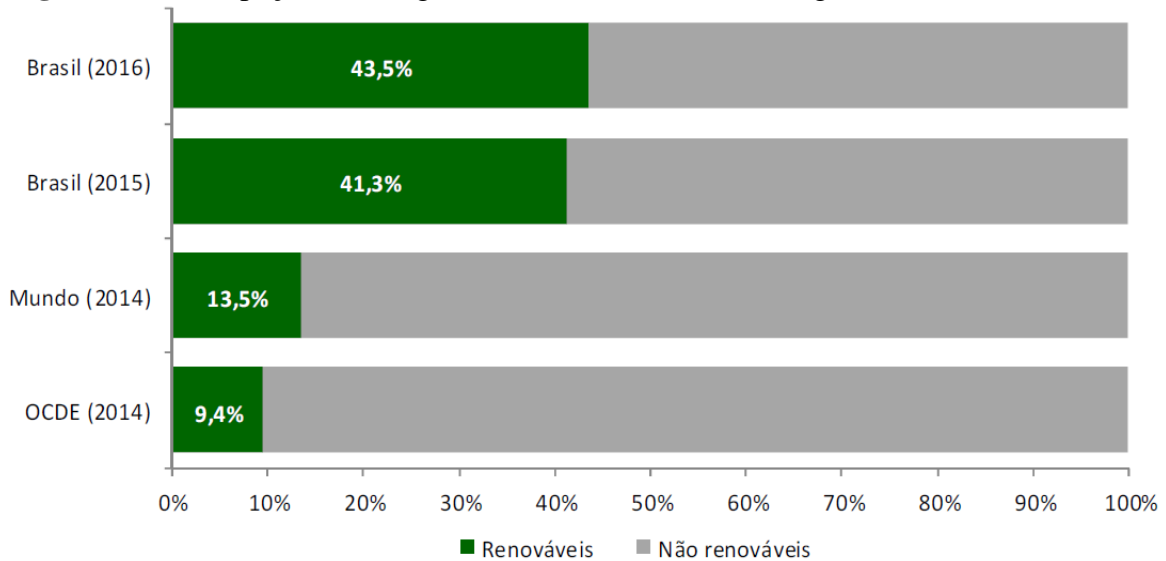
1.2 PROBLEMAS E JUSTIFICATIVAS

A geração elétrica por concentração solar é relativamente simples, pode inclusive ser comparado à geração termelétrica convencional (LODI, 2011), que ao invés da queima de combustíveis de origem fóssil, como gás ou diesel, usa o Sol como fonte primária de calor. Para isso, são utilizados espelhos em grande quantidade posicionados estrategicamente, de modo a refletir de forma concentrada a componente solar direta para um receptor (MALAQUETA, 2012), nesse receptor escoam fluidos absorvedores de calor, que são usados na produção de vapor d'água, que acionam uma turbina geradora de eletricidade.

Esse tipo de geração, apesar de poder ser considerado maduro internacionalmente (LODI, 2011) ainda tem aplicações restritas no Brasil, que tem a matriz elétrica predominantemente hidrelétrica (CASTRO, 2015). As fontes hidráulicas responderam em 2017 por 71,5% da capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional – SIN (ONS, 2017), o que coloca o Brasil à frente de muitos países no ranking de energias renováveis,

como pode ser verificado na Figura 1. Mas apesar de serem consideradas fontes renováveis e limpas, as hidrelétricas causam diversos impactos ambientais e sociais, pois é estimado que no Brasil mais de um milhão de pessoas foram compulsoriamente deslocadas de suas terras devido às inundações provocadas por reservatórios de hidrelétricas, destruindo junto todo um sistema social e ecológico (DERROSSO, 2014).

Figura 1 – Participação de energias renováveis na Matriz Energética brasileira



Fonte: Ministério de Minas e energia: Balanço Energético Nacional, 2017.

Com as várias consequências, principalmente as causadas pelas inundações das represas, projetos de grandes hidrelétricas têm sido cada vez mais difíceis de serem aprovados pelos órgãos regulamentadores do Brasil. Como alternativa surgiram as pequenas centrais hidrelétricas a fio d'água. No entanto, sem os reservatórios a geração fica muito dependente da quantidade de chuvas, que tem maior déficit das últimas décadas (FAPESP, 2018). Com isso o sistema hidráulico perde a confiabilidade e a capacidade de geração fica limitada, o que torna corriqueira a necessidade de recorrer às usinas termelétricas (combustíveis fósseis) para complementar a geração elétrica (OLIVEIRA FILHO, 2014).

Com a limitação da expansão das hidrelétricas fez-se necessária a diversificação da oferta de geração elétrica no Brasil, com especial atenção para fontes renováveis e de baixos impactos ambientais, o que levou o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS a prever no Plano de Operação Energética 2017/2021 a expansão da capacidade instalada de geração de energia de fontes alternativas, entre elas a eólica e solar, que juntas somarão 11% da potência total do Sistema Interligado Nacional – SIN até o final de 2021 (ONS, 2017), como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Evolução da Matriz de Energia Elétrica 2017/2021

Tipo	2016		2021		Crescimento	
	MW	%	MW	%	MW	%
Hidráulica (1)	101.598	71,5	113.784	68,3	12.186	12
Nuclear	1.990	1,4	1.990	1,2	-	0,0
Gás/GNL	12.414	8,7	14.518	8,7	2.104	16,9
Carvão	3.174	2,2	3.478	2,1	304	9,6
Biomassa	7.640	5,4	8.313	5,0	673	8,8
Outros (2)	867	0,6	1.308	0,8	441	50,9
Óleo Combustível/Diesel	4.732	3,3	4.732	2,8		0,0
Eólica	9.611	6,8	16.205	9,7	6.594	68,6
Solar	16	0,0	2.182	1,3	2.166	13.537,5
Total	142.042	100	166.540	100	24.498	17,2

Fonte: (Adaptado) ONS – Plano da Operação Energética 2017/2021 PEN 2017.

Nota: (1) Inclui contribuição das PCHs e da compra de energia do lado paraguaio da UHE Itaipu.

(2) se refere a outras usinas térmicas como Custo Variável Unitário – CVU

É perceptível que o Brasil tem investido na geração eólica, o que fica evidenciado nos números apresentados pela ONS (Tabela 1). Os investimentos nessa tecnologia estendem-se também para capacitação tecnológica da indústria nacional (OLIVEIRA FILHO, 2014), que já produz boa parte dos aerogeradores usados no país, e apontam para o crescimento do setor. Contudo, esse tipo de geração também apresenta problemas, e dizem respeito aos ventos que são incertos no curto prazo, o que dificulta o trabalho do controlador da rede no atendimento da demanda ao longo do dia.

Esse atendimento das variações de demanda elétrica era feito quase que exclusivamente pelas hidrelétricas, mas com a crescente entrada de fontes de produção variável, como a eólica, esse cenário mudou. No entanto, fontes como as de concentração solar podem modular sua geração ao longo do dia convertendo energia solar em energia elétrica de forma indireta, como o já mencionado. Dessa forma a usina poderia controlar sua produção e o melhor momento de geração, dentro de um intervalo de tempo, que seria limitado pela disponibilidade do recurso e capacidade de armazenamento térmico (CASTRO, 2015), o que a torna parcialmente controlável.

A concentração solar associada às demais fontes renováveis da Matriz de Energia Elétrica brasileira seria capaz de promover grande vantagem para o SIN. Essas fontes variáveis, em geração, poderiam contribuir para o armazenamento de água nos reservatórios de regulação, e nos demais momentos as hidrelétricas seriam acionadas (CARVALHO, 2016). Nessa perspectiva o Brasil alcançaria uma solução sustentável para diminuir o acionamento das termoeletricas, garantindo inclusive condições de expansão do SIN.

1.3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O método científico utilizado foi o dedutivo, e como bases teóricas foram consideradas pesquisas experimentais e bibliográfico-documentais, de onde foram consideradas as premissas base do trabalho. Nesse sentido, foram analisados artigos acadêmicos publicados em periódicos e anais de eventos, monografias, dissertações, teses, e informações de organizações e empresas ligadas ao Ministério de Minas e Energia, como relatórios, resoluções e dados estatísticos.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Elaborar um material de pesquisa com as diferentes tecnologias empregadas na geração elétrica por Concentração Solar, evidenciando o processo de armazenamento de calor, de modo a caracterizar o objeto desta pesquisa, que são os fluídos térmicos: sais fundidos e óleos térmicos, no que se relacionam a sua escolha, manejo e ciclo de vida, este último abrangendo também todos os materiais empregados na construção de uma Usina de Concentração Solar – CSP.

2.2 ESPECÍFICOS

No que se relaciona a geração por concentração solar:

- Compreender o princípio de funcionamento;
- Compreender a progressão histórica dessa tecnologia;
- Identificar as diferentes tecnologias desenvolvidas;
- Analisar e identificar os fluídos térmicos usados como armazenadores de calor;
- Conhecer quais são os fluídos térmicos indicados para cada tipo de tecnologia;
- Identificar qual o ciclo de “vida” dos equipamentos e fluídos térmicos utilizados na CSP.

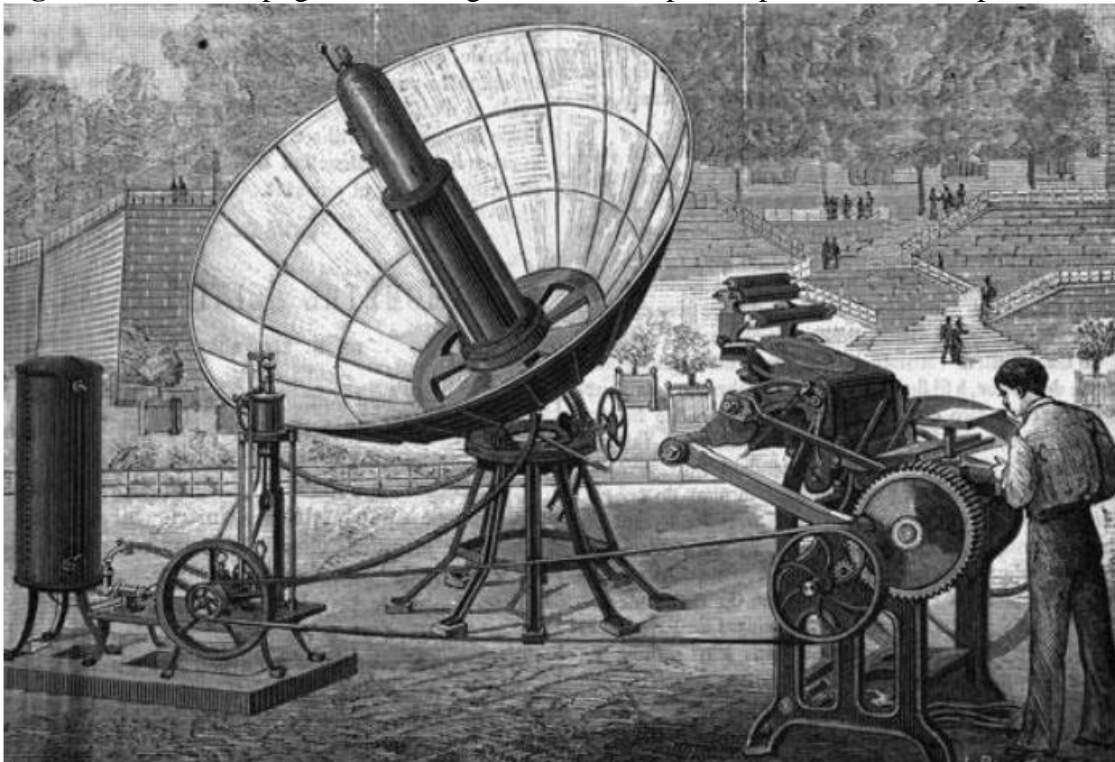
3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 BREVE HISTÓRIA DA GERAÇÃO ELÉTRICA POR CONCENTRAÇÃO SOLAR

Antes mesmo dos anos de Cristo, o Sol já era usado como fonte de energia. Na costa da Sicília, por exemplo, ele foi usado por Arquimedes para defender o porto de Siracusa (212 a.C), onde grandes espelhos incendiaram navios Romanos. Outros relatos, já não tão antigos, contam do uso do Sol em experimentos científicos como o forno de Lavoisier e Josph Priestley (1774), e inventos da engenharia como a máquina a vapor alimentada a energia solar (1860) projetada pelo Engenheiro e professor August Mouchet e construída duas décadas depois com a ajuda de Abel Pifre (EUSTÁQUI, 2011).

A primeira amostra desse trabalho foi exibida na Feira Mundial de Paris, e tratava-se de uma prensa acionada pela luz do Sol, ilustrada na figura 2. Seu mecanismo de acionamento consistia num refletor parabólico que concentra a radiação solar em uma caldeira a vapor, e esta por sua vez está acoplada a uma prensa que tinha capacidade de imprimir 500 páginas por hora (LODI, 2011).

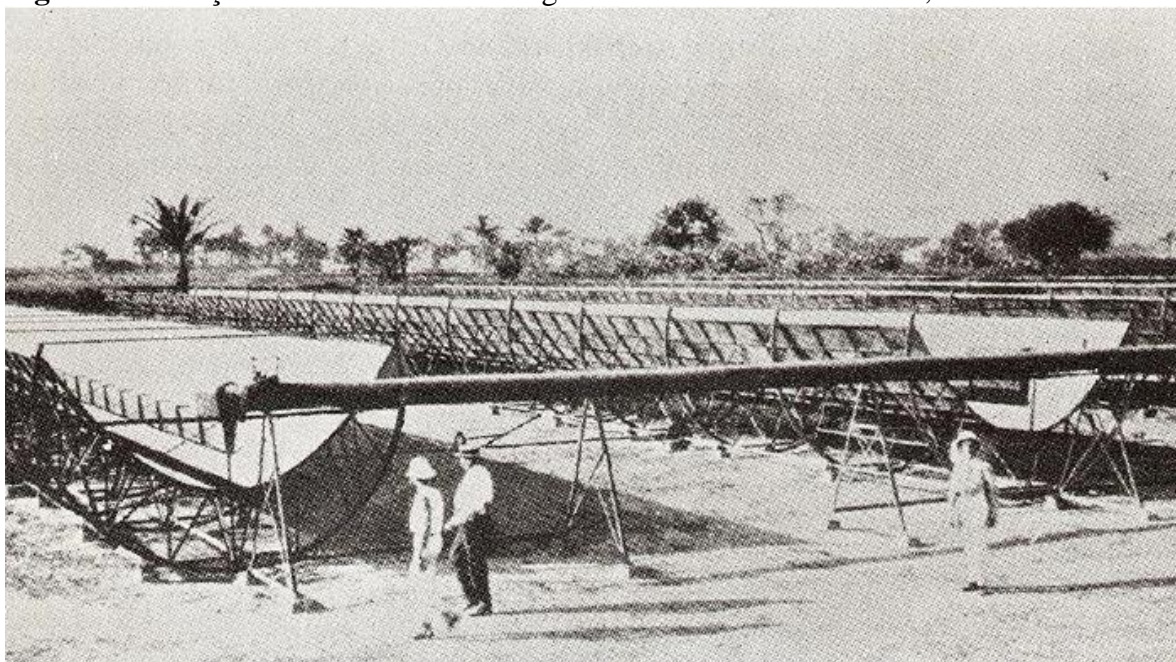
Figura 2 – Prensa tipográfica de August Mouchet operada por coletor solar parabólico



Fonte: RAGHEB, 2011.

Com o tempo essa tecnologia foi ganhando novas formas, e no Egito (1907 - 1913) o Engenheiro americano Frank Shuman usou longos espelhos parabólicos para concentrar a radiação solar não numa caldeira, mas num tubo central, para então bombear água do Nilo e usa-la na irrigação com uma potência de 50 cv, nas imediações do Cairo, como pode ser visto na figura 3 (LODI, 2011).

Figura 3 – Estação de bombeamento de águas do rio Nilo em Al Meadi, 1913



Fonte: RAGHEB, 2011.

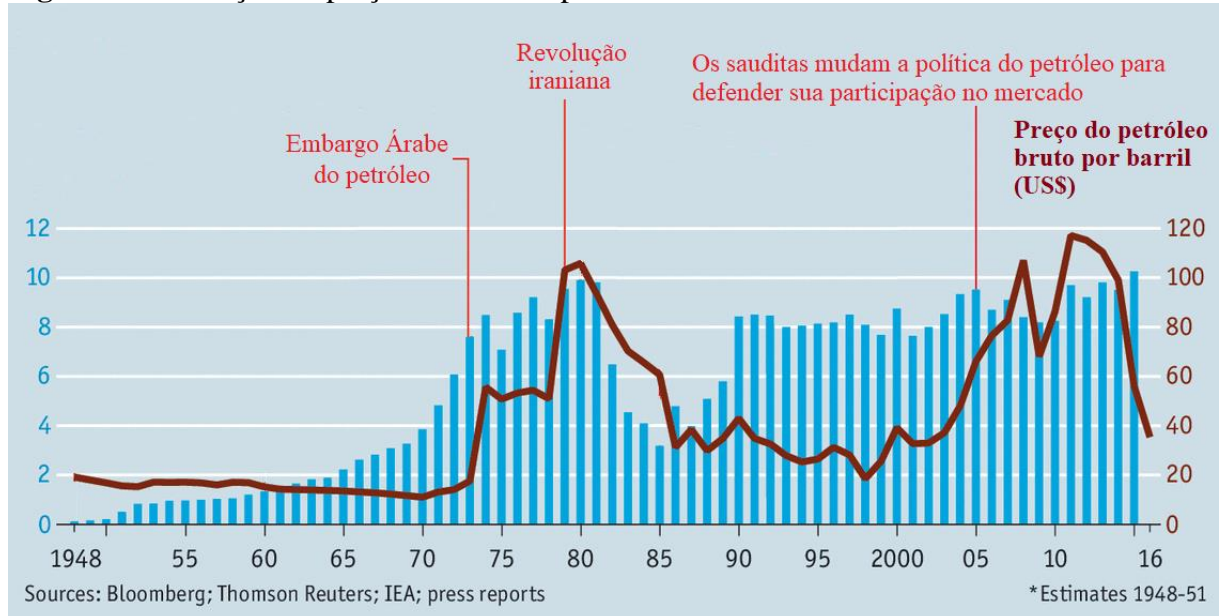
Apesar de se expandir e aprimorar em diferentes projetos pelo mundo, o uso da concentração solar ainda era restrito a pequenas aplicações, como as já mencionadas. No entanto, a crise do petróleo dos anos 70 corroborou para um futuro diferente.

Em 1973 o mercado americano de petróleo respondia sozinho por 6,2 milhões de barris/dia, além disso, eram importantes importadores, especialmente da região do Oriente Médio. Isso fez com que os EUA tivessem um relacionamento diplomático diferenciado com os países desse bloco, sempre pautado pelo interesse no petróleo (MATINHO, 2010).

No entanto, também em 1973 o apoio americano dado a Israel na guerra do Yom Kippur gerou um enorme conflito que acabou resultando num movimento de retaliação por parte dos países produtores de petróleo no Oriente Médio, que suspenderam o fornecimento aos países que apoiavam Israel nessa guerra. Esse seria o começo do fracasso das relações diplomáticas americanas mantidas com o Oriente Médio, e da crise global que

elevaria os preços do petróleo, o que pode ser percebido na figura 4, que apresenta o gráfico da evolução do preço do barril de petróleo (MATINHO, 2010).

Figura 4 – Evolução do preço do barril de petróleo em dólares americanos – USD



Fonte: adaptado THE ECONOMIST, 2010.

Mais adiante, e ainda na década de 70, o Aiatolá Khomeini assumiu o comando do Irã (1979), o que agravou ainda mais a crise do petróleo, uma vez que o Irã era o porto seguro do fornecimento americano, e o deixou de ser para articular um grupo político contra o ocidente, e especialmente os EUA (MELO, 2008). Todos esses acontecimentos, em menos de uma década, provocaram um aumento no preço do petróleo nunca antes experimentado, que levaram os Estados Unidos e grande parte do mundo a buscar alternativas ao consumo dos combustíveis fósseis.

Desse esforço mundial em encontrar alternativas energéticas, o Departamento de Energia dos EUA financiou um sistema de concentração solar que entrou em operação em 1982 com uma potência instalada de 10 MW. O projeto foi batizado de Solar One e representou um grande salto para o amadurecimento da tecnologia de concentração solar. Diferente de seus antecessores, o Solar One tinha o objetivo de gerar eletricidade, e com isso mostrar sua viabilidade (LODI, 2011).

Remodelado, o projeto Solar One tornou-se a Central Solar Two que, em 1996, pode gerar eletricidade por até três horas depois do pôr do sol, isso devido ao sistema de sais fundidos usado como fluido térmico para armazenar o calor da radiação do Sol. A Central

Solar Two (figura 5) foi base de estudos e desenvolvimento de tecnologia, e esteve em operação até 1999 (LODI, 2011).

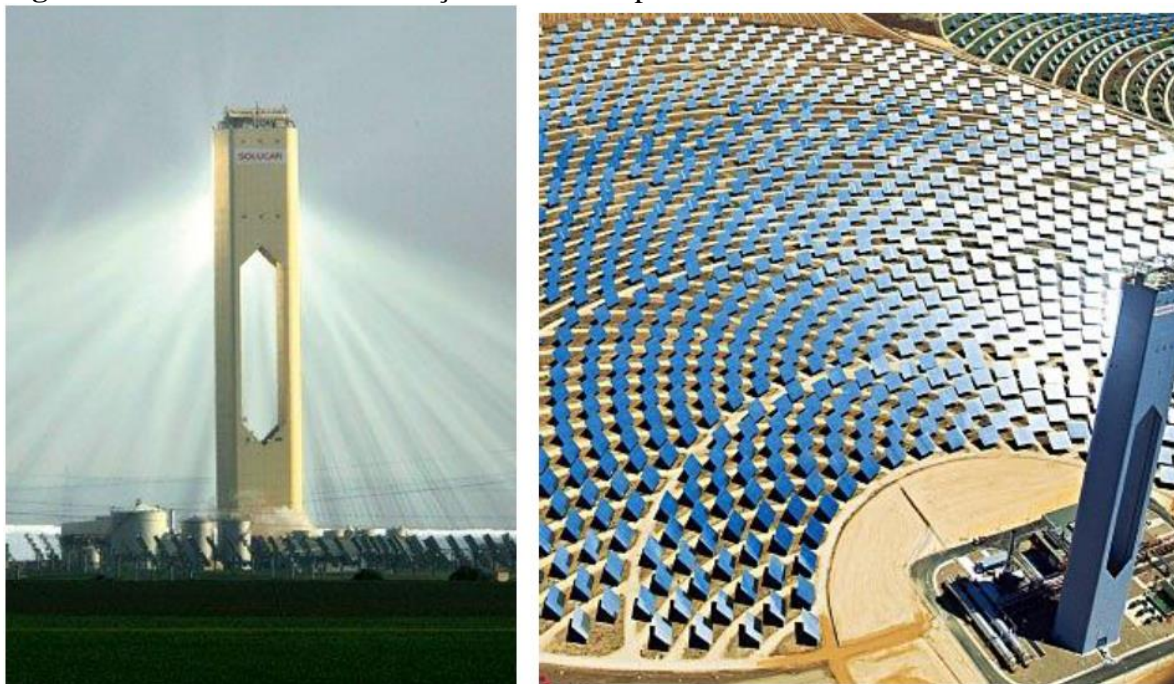
Figura 5 – Central Solar Two



Fonte: U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, [2018].

No continente Europeu, a Espanha foi pioneira e, paralelo ao projeto Solar One, colocou em operação a Plataforma Solar de Almería em 1981, no deserto de Tabernas. E foi a primeira vez que a energia gerada através da concentração solar foi fornecida à rede elétrica. Nos anos seguintes foram construídas plantas comerciais, as primeiras do mundo, com capacidade instalada de 14 MW a 80 MW, como as demonstradas na figura 6. Mais tarde (1987) o governo alemão firmou uma importante parceria com a Espanha, que resultaram em grandes investimentos em pesquisa e desenvolvimento (MALAGUETA, 2012).

Figura 6 – Centrais de Concentração Solar na Espanha



Fonte: RAGHEB, 2011.

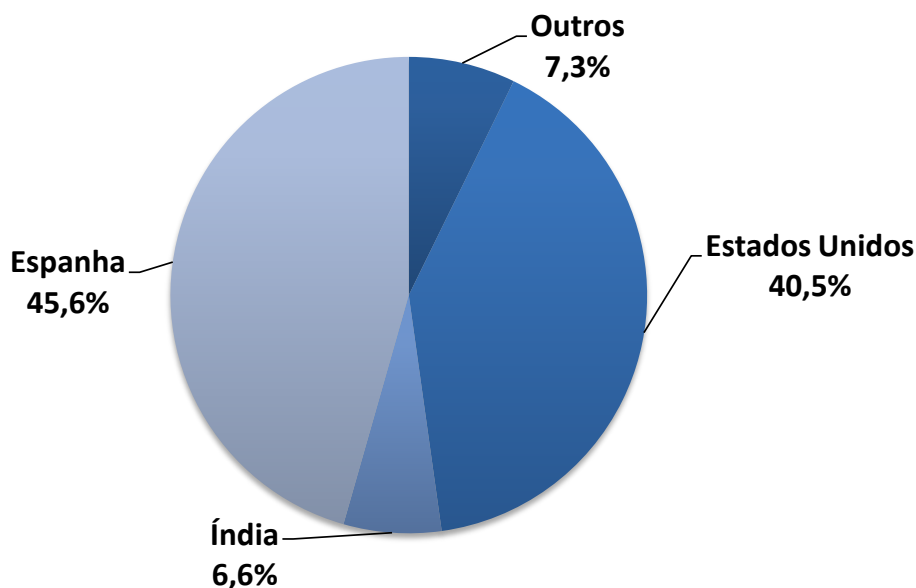
Com os projetos desenvolvidos nos Estados Unidos e Espanha a geração elétrica por Concentração Solar mostrou-se viável, e foi além ao mostrar ser capaz de mitigar parte do problema relacionado à intermitência da radiação solar, quando foi capaz de “armazenar” o calor da radiação solar por dado tempo (MALAGUETA, 2012). Evidenciando para o mundo que essa tecnologia é uma alternativa eficaz para a crescente demanda energética mundial, ampliando o número de interessados e os investimentos em pesquisa e desenvolvimento, importante avanço histórico.

Com isso, foram desenvolvidas diferentes tecnologias, que convergem para mecanismos alternativos de concentração solar, que serão discutidas no próximo tópico.

3.2 TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO POR CONCENTRAÇÃO SOLAR

Os investimentos em pesquisa e desenvolvimento resultaram na expansão das centrais de geração por Concentração Solar pelo mundo, e hoje são mais de 100 plantas em operação em diversos países, mas que ainda se concentram nos Estados Unidos e Espanha, que juntos representam mais de 86% de toda energia heliotérmica produzida no mundo (BRANCALÃO, 2015), como pode ser verificado na figura 7.

Figura 7 – Centrais de Geração Elétrica por Concentração Solar no Mundo - em potência instalada



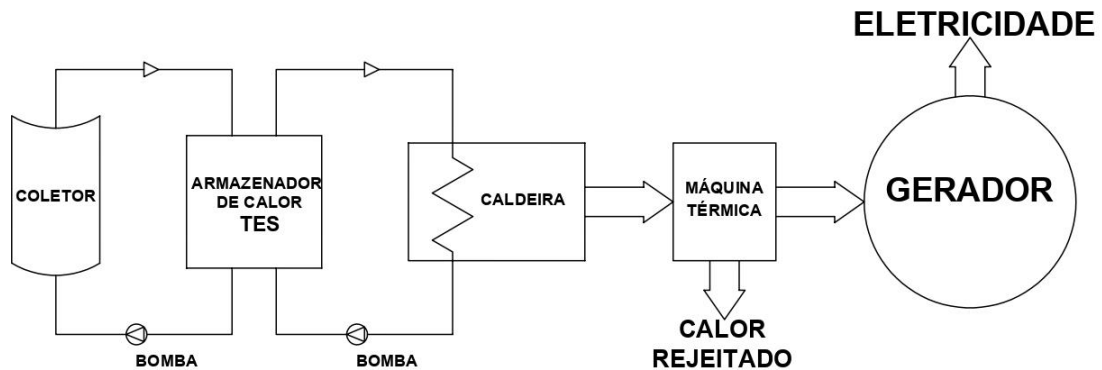
Fonte: adaptado BRANCALIÃO, 2015.

Mesmo com a expansão e popularização das plantas de Concentração Solar no mundo, ainda não existem centrais desse tipo instaladas e em funcionamento no Brasil, o que não impediu que esse tipo de geração elétrica fosse estudado por aqui. No Brasil já foram desenvolvidas importantes pesquisas, como o projeto HELIOTERM (2012 - 2015) que resultou numa planta piloto de geração heliotérmica (1 MW) em Petrolina/PE (MALAGUETA, 2012) e o mais recente projeto de implantação de uma central de concentração solar da Eletrosul, em Laguna (SC), com previsão de operação para 2020.

Outras iniciativas também são responsáveis por importantes avanços em pesquisa e desenvolvimento na Concentração Solar no Brasil, como o acordo de cooperação com a Alemanha por meio da GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit), que permitem identificar, por exemplo, qual a melhor tecnologia em Concentração Solar para cada microrregião brasileira, e além disso, aperfeiçoar e adaptar as tecnologias existentes para as condições climáticas e particularidades de cada microrregião (LODI, 2011).

As tecnologias de Concentração Solar utilizam da conversão termodinâmica para geração elétrica e para isso utiliza-se de coletores solares como trocadores de calor. Esse coletor é o componente que absorve a radiação solar direta e a converte em calor, que é então transferido para o fluido de transferência térmica – HTF que circula pelo coletor (LODI, 2011). É esse o calor usado para operar a máquina térmica que gera energia elétrica, em um sistema de conversão mostrado na figura 8.

Figura 8 – Diagrama do processo de geração elétrica por Concentração Solar



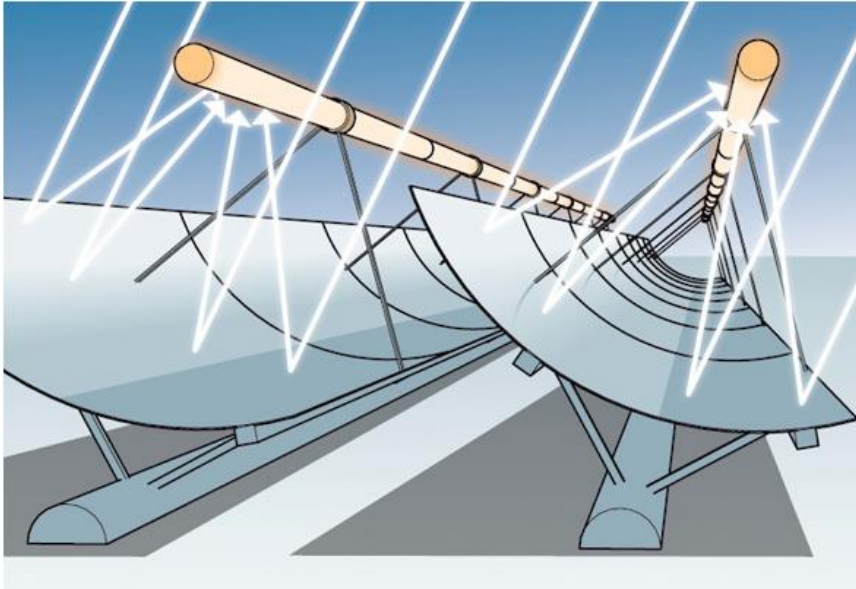
Fonte: adaptado KALOGIROU, 2011.

Neste tópico serão apresentadas as quatro principais tecnologias de Concentração Solar disponíveis atualmente, o cilindro parabólico, o refletor linear Fresnel, o disco parabólico e o sistema de receptor central, também conhecido como torre solar. O objetivo da apresentação será compreender os princípios de funcionamento, as diferenças e particularidades de cada uma das tecnologias.

3.2.1 REFLETORES CILÍNDRICOS PARABÓLICOS

O coletor cilíndrico parabólico, também conhecido como “calha solar”, é o sistema mais usual no mundo (ANEEL, 2015). Nesse sistema o coletor consiste em uma superfície refletora com geometria cilíndrico-parabólica e um tubo receptor posicionado em seu eixo longitudinal (LODI, 2011), de modo que a radiação direta incidente sobre essa superfície é refletida na direção do coletor, posicionado ao longo da linha do foco dos refletores. Esse processo é representado na figura 9.

Figura 9 – Radiação solar direta refletida no coletor



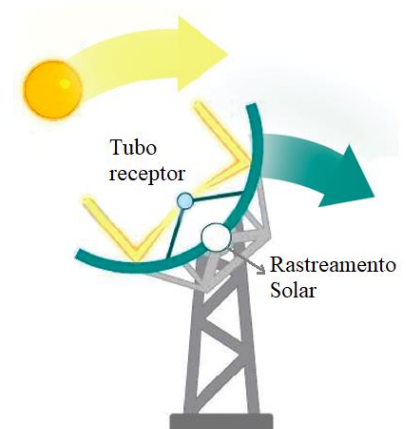
Fonte: KRAEMER, 2016.

O conjunto de coletores é composto por vidro espelhado sobre uma estrutura metálica equipada com um sistema de rastreamento do Sol, que permite que a calha solar acompanhe a orientação do Sol ao longo do dia com um sistema de controle, no eixo da estrutura, alterando apenas a orientação Leste-Oeste do coletor (CASTRO, 2015), como pode ser visto na figura 10.

Figura 10 – Sistema de rastreamento solar



Fonte: adaptado MALAGUETA, 2012.



O receptor é formado por um tubo metálico de cor escura, geralmente de cor preta por absorver mais radiação, coberto por um cilindro de vidro para evitar perdas térmicas por convecção (MALAGUETA, 2012). Entre o tubo metálico e o cilindro de vidro é formado

vácuo, como pode ser visto na figura 11. É por esse tubo receptor que circula o Fluido de Transferência Térmica – HTF (LODI, 2011).

Figura 11 – Tubo receptor cilindro parabólico



Fonte: RIOGLASS, 2018.

Centrais que utilizam dessa tecnologia podem optar por usar óleo sintético, sal fundido ou vapor como fluido térmico, no entanto, o mais usual é o óleo sintético. Essa opção acaba limitando a eficiência das turbinas, uma vez que a temperatura de trabalho fica limitada à máxima suportada pelo óleo, que se degrada em temperaturas superiores a 400°C (CASTRO, 2015).

Pode-se dizer que a tecnologia cilíndrica parabólica é a mais madura entre as tecnologias de concentração solar, pois está disponível comercialmente desde a década de 80. Empreendimentos com essa tecnologia possuem capacidade instalada entre 50 e 80 MW, mas também podem ser exploradas de forma vantajosa entre 125 MW e 150 MW (LODI, 2011).

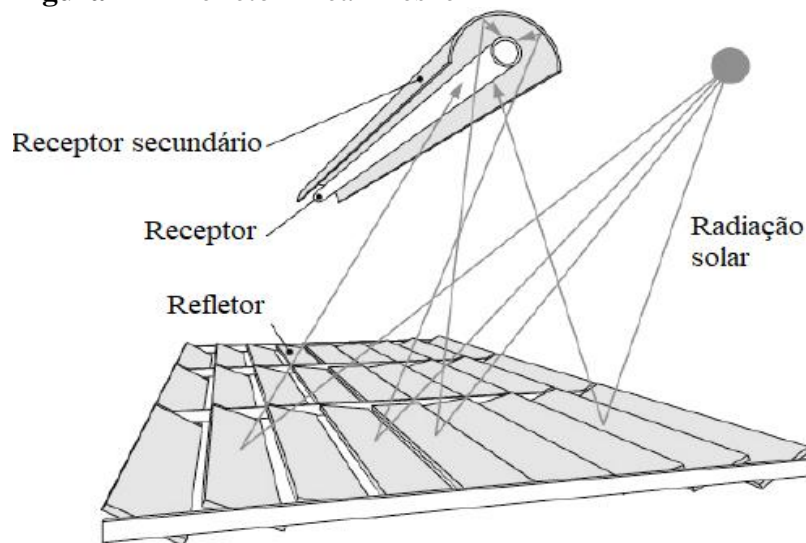
3.2.2 REFLETORES LINEARES FRESNEL

A tecnologia de refletores lineares Fresnel é similar à cilindro-parabólico, a diferença entre os refletores é que em vez de espelhos curvos, são usados refletores planos ou levemente curvados, e por isso apresenta mais simplicidade, o que caracteriza sua maior vantagem em relação a todas as demais tecnologias de Concentração Solar (CARVALHO, 2016).

O nome dado a essa tecnologia é uma homenagem ao criador das lentes segmentadas, o francês Augustin-Jean Fresnel, e consiste em um sistema óptico constituído

por vários pequenos refletores planos (EUSTÁQUIO, 2011) alinhados de modo que a radiação solar se concentre em um receptor fixo, que tem um receptor secundário para maior aproveitamento da radiação solar, como pode ser visto na figura 12. Uma segunda vantagem em relação à tecnologia cilindro-parabólico é que o controle de rastreamento do sol ocorre apenas com os refletores de forma independente, uma vez que o receptor é fixo no espaço em uma estrutura independente, o que reduz custos com junções móveis (CASTRO, 2015).

Figura 12 – Refletor linear Fresnel



Fonte: adaptado POULLIKKAS, [2018].

No receptor também se utilizam Fluidos de Transferência Térmica – HTF para produção de vapor, no entanto, a produção de vapor diretamente no receptor tem se mostrado uma alternativa promissora na redução de custos. A figura 13 mostra um sistema de receptor Fresnel onde circula água como HTF, o que dispensa o uso de trocadores de calor para geração de vapor, reduzindo os custos de investimento (CARVALHO, 2016).

Figura 13 – Tubo receptor linear Fresnel em campo solar



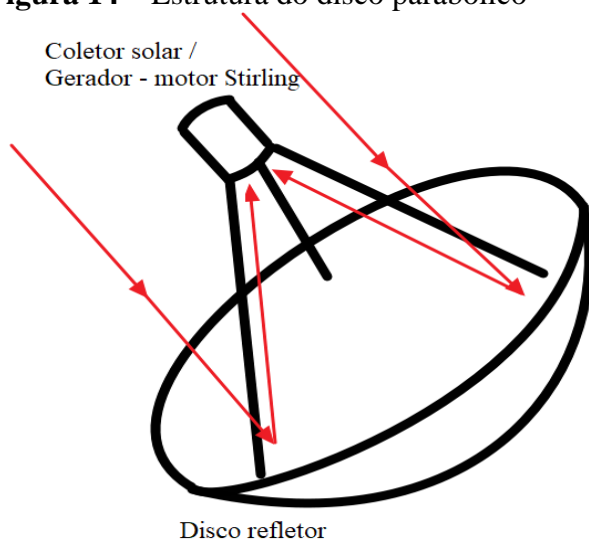
Fonte: RIOGLASS, [2018].

Todavia, essa tecnologia não é considerada madura, e a maior parte das plantas existentes no mundo são plantas piloto. Além disso, para evitar que um refletor gere sombra em outro, é preciso aumentar o tamanho da área do campo solar, o que acaba se tornando uma desvantagem (MALAGUETA, 2012). A terceira desvantagem está relacionada às maiores perdas ópticas e ao menor aproveitamento da radiação nas primeiras horas do dia, quando comparada a cilindro-parabólica (CASTRO, 2015).

3.2.3 DISCOS PARABÓLICOS

Esse sistema é formado por discos refletores em formato parabólico com um gerador posicionado no receptor (CASTRO, 2015), como o mostrado na figura 14. Portanto, o sistema é formado por unidades autônomas de geração, onde cada unidade tem um gerador acoplado a um motor Stirling ou, em alguns casos específicos, a uma microturbina (LODI, 2011).

Figura 14 – Estrutura do disco parabólico

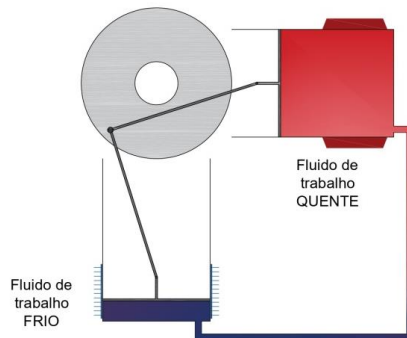


Fonte: TEW, 2016.

O motor Stirling é o mais utilizado nesse sistema, o que se deve, em grande parte, a sua elevada eficiência na conversão da energia térmica em mecânica, acima de 40%, e a dispensa de vapor d'água (EUSTÁQUI, 2011). O seu princípio de funcionamento é similar ao de motores convencionais, como o mostrado na Figura 15, e acontece através da compressão de um fluido de trabalho frio (azul), seguido pelo aquecimento deste fluido comprimido (vermelho), o que resulta em sua expansão em um pistão, produzindo energia

mecânica. Para tanto, o receptor também é equipado com um banco de tubos com fluido refrigerante circulante, geralmente hidrogênio ou hélio.

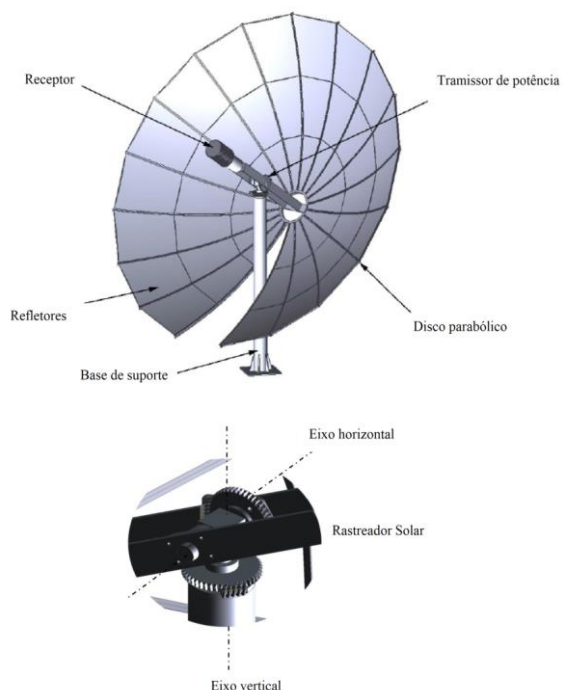
Figura 15 – Motor Stirling



Fonte: Autoria própria, 2019.

Assim como nas tecnologias analisadas anteriormente, os discos parabólicos também são equipados com sistema de rastreamento solar, no entanto, os discos giram ao longo de dois eixos para aperfeiçoar a captura da radiação incidente (OLIVEIRA FILHO, 2014), como mostra a figura 16. Dessa forma, o coletor está sempre apontado para o Sol, o que faz deste o dispositivo com maior eficiência óptica (CASTRO, 2015), onde a concentração obtida é da ordem de 1000 a 3000 vezes, e pode alcançar temperaturas de até 1500°C (LODI, 2011).

Figura 16 – Sistema de rastreamento solar



Fonte: HIJAZI et al, 2016.

Essa tecnologia permite a instalação de plantas em terrenos relativamente acidentados, e é a mais indicada para localidades remotas (OLIVEIRA FILHO, 2014), no entanto, o disco parabólico não permite armazenamento térmico (LODI, 2011), além de possuir pouca maturidade e não estar disponível comercialmente (CARVALHO, 2016), mas está sendo estudado para aplicações futuras em geração distribuída.

3.2.4 SISTEMA DE RECEPTOR CENTRAL

A tecnologia torre solar conta com várias plantas comerciais em operação, e nesse tipo de sistema o receptor é posicionado no alto de uma torre, para o qual são direcionados os raios solares através de vários refletores planos, chamados de heliostatos. Um sistema similar à tecnologia Fresnel, porém com o foco pontual, em vez de linear, como mostra a figura 17 (CASTRO, 2015).

Figura 17 – Campo de heliostatos em sistema torre solar



Fonte: KRAEMER. 2016.

Nesse sistema o campo solar é composto por centenas, milhares ou até dezenas de milhares de heliostatos, e cada um segue o Sol de forma individual, com controle em dois eixos, concentrando ao longo do dia a radiação direta do Sol no topo da torre solar, onde está o receptor. Existem duas configurações entre os campos solares nessa tecnologia, o campo

norte, onde os heliostatos são posicionados apenas num dos lados da torre solar para refletir a radiação na direção Sul, e o campo circular, em que os heliostatos rodeiam totalmente a torre solar (EUSTÁQUIO, 2011). Essas configurações podem ser vistas na figura 18.

Figura 18 – Campo solar norte e Campo solar circular



Fonte: TORRESOL, [2018].

As plantas de receptor central alcançam concentração de 300 a 1000 vezes, e com isso podem atingir elevadas temperaturas de operação, da ordem de 800°C a 1000°C (LODI, 2011), o que permite a utilização de turbinas de alta potência, que representam maior eficiência (CARVALHO, 2016). Essas elevadas temperaturas de trabalho também tornam o sistema de armazenamento térmico mais eficiente e com custos menores se comparados ao modelo calha parabólica (OLIVEIRA FILHO, 2014).

Essa tecnologia tem ganhado espaço internacional à medida que novas centrais são construídas, no entanto, seu consumo relativamente alto de água na produção de vapor tem se mostrado um problema, uma vez que estas centrais são colocadas em áreas desérticas onde esse recurso é escasso.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 FLUIDOS DE TRANFERÊNCIA TÉRMICA – HTF

A energia em um sistema de Concentração Solar – CSP é armazenada na forma de calor. Essa energia é coletada através da concentração da irradiação direta solar, como discutido no tópico anterior, onde foram apresentados os diferentes tipos de refletores. Todavia, a transferência e armazenamento do calor exigem outros componentes em um sistema CSP.

Para transferência do calor em um campo de refletores, ou mesmo em uma torre solar, são utilizados os Fluidos de Transferência Térmica, representado pela sigla HTF, do inglês Heat Transfer Fluid. Em uma Usina CSP, o HTF é o principal responsável pelo sucesso ou não da Usina, pois é ele quem transporta toda a energia térmica destinada para os armazenadores de calor e para geração de eletricidade (VIEBAHN, 2008).

Existem três principais tipos de HTF, água/vapor, óleo sintético e sais fundidos. O vapor d'água utilizado para movimentação das turbinas do gerador, e presente em quase todos os sistemas CSP, não é considerado um HTF. Este, para ser tratado como tal, é usado em sistemas de geração de vapor direto, como os comumente usados nos campos Lineares Fresnel. E apesar de parecer simples, são de difícil controle de pressão e temperatura (MAZZAFERRO, 2017).

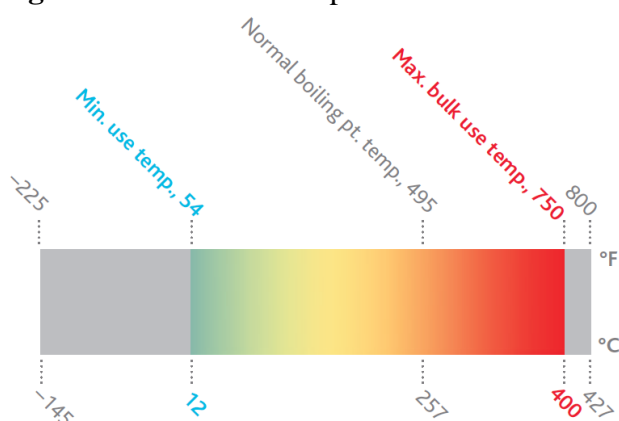
Os óleos sintéticos são aplicados como HTF na maioria das Usinas comerciais CSP, e não atingem altos níveis de pressão, como no vapor d'água. Todavia, as suas principais desvantagens estão relacionadas à limitação da temperatura de operação, riscos de incêndio e contaminação do ambiente no caso de fugas (KALOGIROU, 2009). Dado à sua grande utilização como HTF, os óleos sintéticos serão tratados com maior profundidade no tópico 4.1.1.

A aplicação dos sais fundidos como HTF também tem fator limitante na temperatura, a mistura comumente usada na composição do sal é 60% de nitrato de sódio ($NaNO_3$) e 40% de nitrato de potássio (KNO_3), que tem temperatura de fusão igual a 230°C (KALOGIROU, 2009). Manter essa temperatura e evitar o congelamento do sal nas centenas de metros dos tubos receptores é um desafio para sua aplicação como HTF (MAZZAFERRO, 2017). Por outro lado, ele apresenta vantagens como armazenador de calor, o que será discutido no tópico 4.2.

4.1.1 ÓLEO SINTÉTICO COMO HTF

Os óleos sintéticos como HTF são vastamente utilizados em Usinas CSP, isso se deve a facilidade do controle de operacionalização quando comparado com o vapor d'água e os sais fundidos, o que se atribui a sua faixa de temperatura de trabalho e aos seus níveis de pressão. A figura 19 apresenta a faixa de temperatura de trabalho do óleo Therminol®VP-1 ([2019]) (Óxido Biphenyl/diphenyl – DPO), mais utilizado em Usinas CSP.

Figura 19 – Faixa de temperatura de trabalho do óleo Therminol ® VP-1



Fonte: EASTMAN Chemical Company Corporate Headquarters, [2019].

A tolerância máxima de temperatura, mantendo as propriedades do óleo, é 400°C. Temperaturas superiores influenciam diretamente na formação de hidrogênio, destruindo o vácuo de isolamento térmico dos tubos receptores, além de provocar reações de craqueamento, limitando as propriedades térmicas do óleo (PÉREZ, 2018).

Esses limitantes implicam diretamente na exclusão do óleo sintético como armazenador de calor, por outro lado, as garantias de viscosidade de trabalho a 12°C são aliadas de sua aplicação como HTF. No entanto, os elevados ganhos de eficiência térmica com o uso de sais fundidos como HTF, dado a sua gama de temperatura de trabalho mais elevada, tem incentivado diversas linhas de pesquisa no sentido de viabilizar o uso do sal fundido simultaneamente como HTF e armazenador de calor (PÉREZ, 2018).

A substituição dos óleos sintéticos também é incentivada no objetivo de reduzir os impactos ambientais das Usinas CSP, o que será discutido com mais profundidade em tópico específico.

4.2 ARMAZENADOR DE CALOR – TES

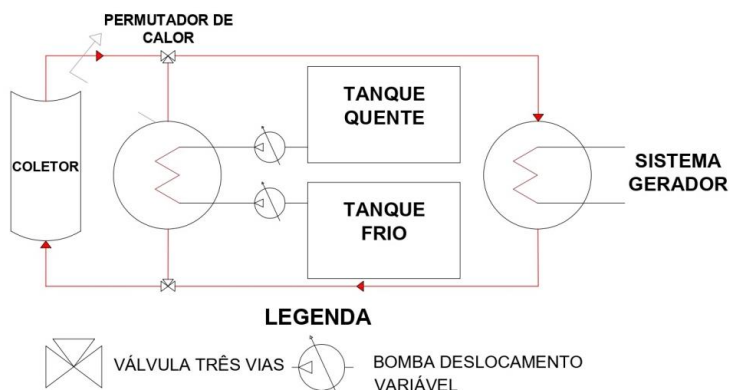
Os armazenadores de calor tem o objetivo de reservar a energia térmica transportada pelo HTF para uso em períodos de ausência de radiação solar (OLIVEIRA FILHO, 2014). Atuam como baterias garantindo que a Usina CSP continue gerando eletricidade mesmo com ausência de luz solar, o que confere maior estabilidade a este sistema.

É correto afirmar, por tanto, que o armazenador de calor é o diferencial da CSP das fontes como a eólica e a fotovoltaica, pois a geração de eletricidade é dissociada da energia solar (CARVALHO, 2016). A sigla TES é aplicada para designar os armazenadores de calor, e deriva do inglês: Thermal Energy Storage.

O uso do TES é feito geralmente com sal fundido, uma mistura de nitrato de sódio com nitrato de potássio, como já apresentado no capítulo 4.1. Sais fundidos não são inflamáveis, formam um fluido estável, não oferecem degradação dos tubos receptores e são ambientalmente amigáveis, uma vez que em situações de fuga, por exemplo, irão se congelar rapidamente sem oferecer risco de contaminação (PÉREZ, 2018).

O processo de armazenamento térmico ocorre através de dois tanques, o frio, onde o sal é mantido a temperaturas mais baixas, mas ainda em estado fundido ($\sim 290^{\circ}\text{C}$), e o quente, que armazena o sal aquecido em torno de 540°C (EUSTÁQUIO, 2011). O calor que será armazenado no TES necessita passar por um permutador de calor que fará a troca de energia do HTF para o TES, processo que ocorre durante o dia, quando o TES é carregado. Durante o processo de carga do TES, o sal é bombeado do tanque frio para o tanque quente, atravessando o permutador de calor, onde é aquecido, o controle do fluxo de HTF é feito por válvulas de três vias, como o exemplificado na figura 20.

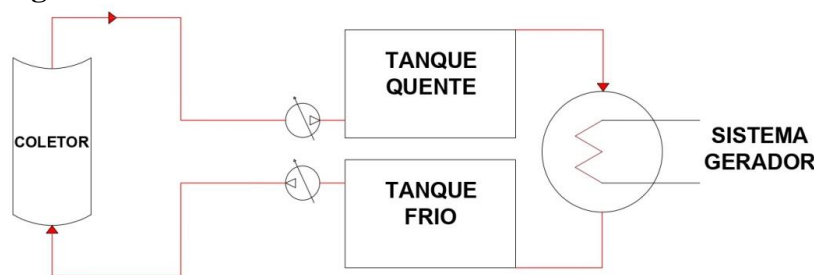
Figura 20 – Sistema armazenador de calor TES



Fonte: adaptado MAZZAFERRO, 2017.

Nos períodos em que não há radiação solar o sal é bombeado do tanque quente para o tanque frio, atravessando o permutador de calor, onde aquece o HTF. Em sistemas diretos, onde o fluido HTF e TES são o mesmo não existe a necessidade de permutador de calor (MAZZAFERRO, 2017). Nesse sistema o sal aquecido é bombeado dos tubos receptores para o tanque quente, de onde sai para o sistema gerador e em seguida para o tanque frio, onde reinicia o ciclo, como o ilustrado na figura 21.

Figura 21 – Sistema armazenador de calor – TES direto



Fonte: adaptado MAZZAFERRO, 2017.

Existem Usinas CSP em operação dimensionadas para 6~15 horas de geração em carga total com o TES (LODI, 2011), onde é necessário o uso de grandes quantidades de sal, nesses casos o óleo usado como HTF não chega a representar 7% em peso da quantidade de sal fundido no TES (VIEBAHN, 2008).

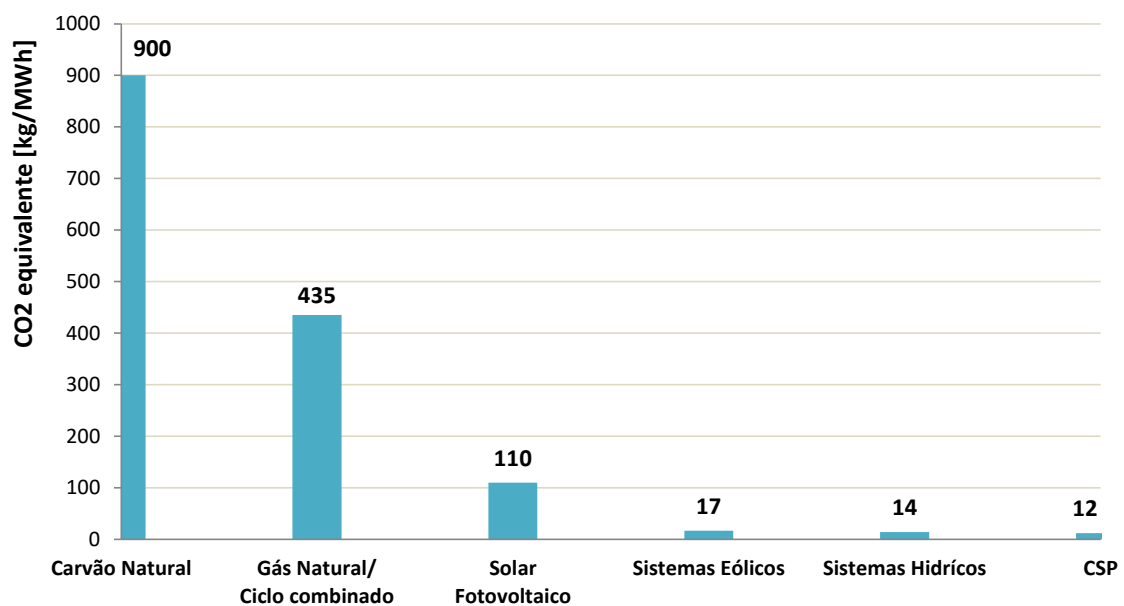
Em sistemas diretos, como o ilustrado na figura 21, o óleo HTF é substituído pelo sal fundido, o que implica diretamente em índices como a temperatura mínima de trabalho, impactos ambientais e ciclo de vida dos materiais. Existem estudos que avaliam e quantificam esses índices, como o realizado por Pérez (PÉREZ, 2018), que aponta a viabilidade de substituir o óleo Therminol®VP- 1 por sais fundidos em Usinas CSP de uma perspectiva ambiental.

4.3 CICLO DE VIDA DE UMA USINA CSP

A avaliação do ciclo de vida e do impacto ambiental provocado por uma Usina CSP se estende para além de falhas como vazamentos e descarte de resíduos. São consideradas as matérias-primas, as emissões de poluentes no ar, água e solo, resíduos sólidos e o consumo de recursos por unidade de produção, no caso a eletricidade (MAZZAFERRO, 2017). Dessa forma é possível construir uma visão dos impactos ambientais de toda a cadeia produtiva.

Considerar todos os processos da cadeia produtiva de uma Usina é uma maneira de quantificar sua pegada ecológica. No capítulo 1.2 foi apresentado o cenário da matriz de energia elétrica brasileira e a importância das fontes hídricas que, como o discutido, possuem grandes impactos ambientais. Os campos de CSP apresentam ter vantagens ambientais como o fato de cada m² de coletor solar evitar a emissão de 250~400 kg de CO₂ por ano, como o ilustrado na figura 22 (KORONEOS, 2008). Por outro lado, é preciso definir outros parâmetros para quantificar com mais precisão os reais impactos ambientais envolvidos em uma Usina CSP, evitando incoerências como as de algumas UHEs no Brasil.

Figura 22 – Emissões de CO₂ em diferentes tecnologias de energia elétrica

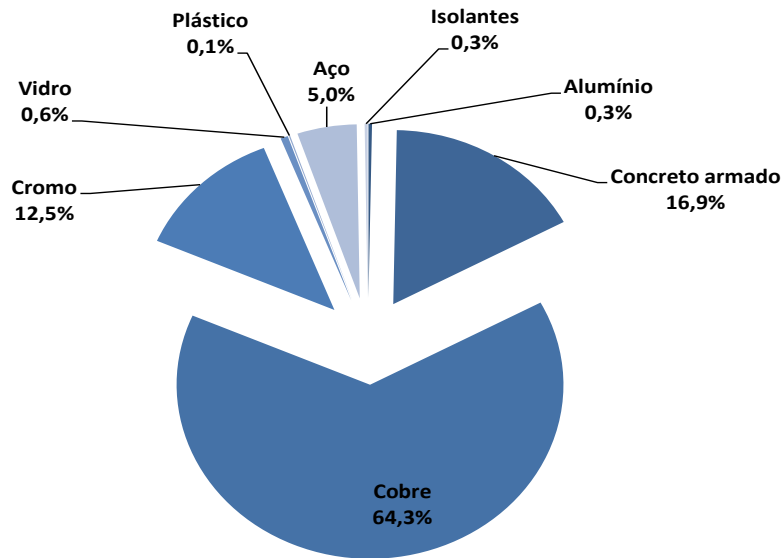


Fonte: adaptado KORONEOS, 2008.

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente considera que todos os produtos causam degradação ambiental de alguma forma, seja por sua fabricação, utilização ou eliminação. E tendo essas diretrizes como base, Koroneos (2008), considerou as etapas de minério das matérias primas, processamento de materiais, construção de peças, transporte e montagem das peças, operação da Usina CSP, desativação/reciclagem e descarte de resíduos, para mensurar os impactos ambientais de uma Usina CSP com sistema de receptor central.

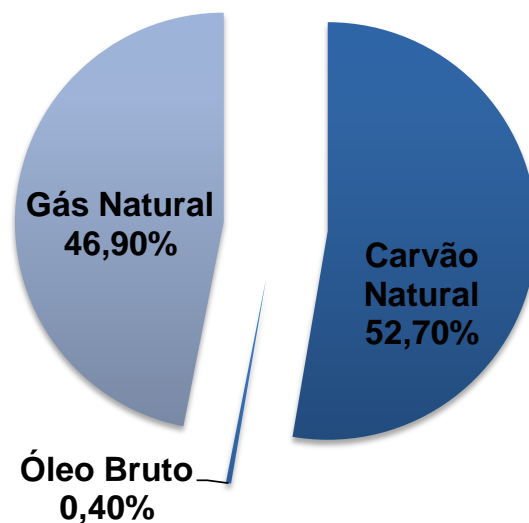
Em seu estudo foram levantados, inicialmente, todos os materiais necessários para construção de uma Usina CSP com potência instalada de 1MW. O levantamento leva em consideração as matérias primas e a energia utilizadas em todos os processos mencionados. As figuras 23 e 24 apresentam alguns dos seus resultados, sendo que na figura 24 são apresentadas as participações das fontes de energia utilizadas nos processos analisados.

Figura 23 – Composição dos materiais usados na construção de Usina CSP Torre Solar 1MW



Fonte: adaptado KORONEOS, 2008.

Figura 24 – Distribuição da energia usada nos processos de desenvolvimento de Usina CSP 1MW



Fonte: adaptado KORONEOS, 2008.

Os materiais mais presentes no levantamento de Koroneos (2008) são o cromo e cobre, que em seus processos de minério e processamento utilizam principalmente fontes fósseis, o que reflete diretamente na figura 24. Para uma visão mais ampla das dimensões da energia empregada nesses processos a tabela 2 apresenta a quantidade de energia em MJ/Planta gasta em todas as etapas analisadas separadas por material, para uma Usina CSP com receptor central e potencia instalada de 1MW. Na tabela é possível comparar a energia empregada para preparação de cada material.

Tabela 2 – Uso total de energia para produção de material de Usina CSP 1MW

Material	MJ
Alumínio	357.979,16
Concreto armado	1.837.811,60
Cobre	241.158.966,50
Cromo	129.588.877,00
Vidro	15.096,00
Plástico	118.468,19
Aço	24.864.746,13
Isolamento	3.241.538,85
TOTAL	401.183.483,44

Fonte: adaptado KORONEOS, 2008.

A partir dessas informações Koroneos (2008) concluiu que o principal impacto ambiental associado às Usinas CSP está na contribuição com a emissão de gases do efeito estufa, sugerindo intervenções nessas etapas do ciclo de vida dos materiais da Usina CSP e programas de sequestro de carbono, como meios de reparação.

Para as análises apresentadas por Koroneos (2008) foi considerado que as peças percorreriam uma distancia média de 100 km até o canteiro de obra da Usina CSP. Essa informação deve ser considerada para aplicação em estudos futuros, mesmo que o óleo bruto represente 0,4% da energia total usada nos processos, visto que muito provavelmente as emissões associadas ao transporte seriam maiores no Brasil, onde a tecnologia CSP não é madura, o que levaria a grandes volumes de importação.

4.3.1 ÓLEOS E SAIS HTF E TES

Ao passo em que Koroneos (2008) avalia com grande profundidade os impactos ambientais associados às etapas de implantação da Usina CSP, Pérez (2018) faz uma análise mais aprofundada com do ciclo de vida dos fluidos usados como HTF e TES. Para isso foram considerados três fluidos diferentes, os mais comumente usados em Usinas CSP, cuja composição é detalhada na tabela 3.

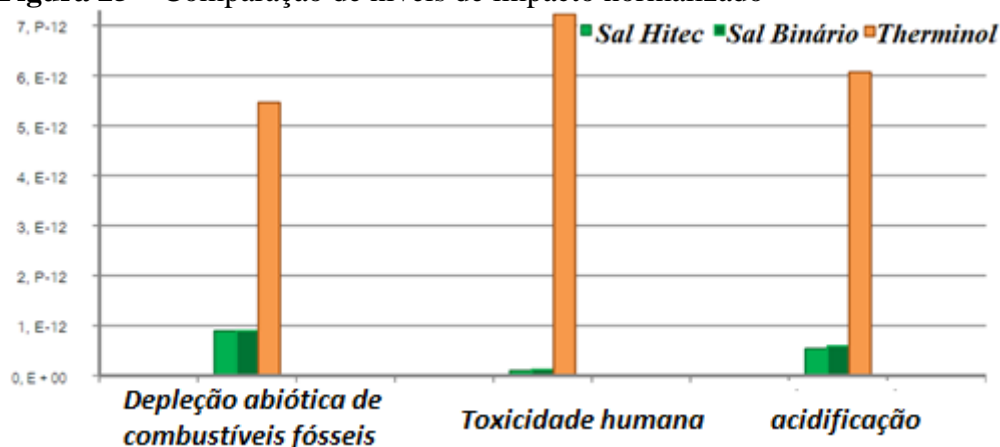
Tabela 3 – Composição de 1kg de fluido térmico CSP

kg	Nitrato de sódio	Nitrato de potássio	Nítrito de Sódio	Éter difenílico	Bifenilo
Sal Binário	0,6	0,4	-	-	-
Sal Hitec®	0,07	0,53	0,4	-	-
Therminol ®VP-1	-	-	-	0,735	0,265

Fonte: adaptado PÉREZ, 2018.

Para comparação e análise dos fatores de impacto associados aos fluidos apresentados na tabela 2, Pérez (2018) optou por normalizar os indicadores, além de adotar 1kg de massa para os três fluidos estudados, de modo que seus resultados fiquem em escala de impacto equivalente. Em seu estudo foram consideradas nove categorias de impacto, das quais as categorias de depleção abiótica de combustíveis fósseis, índice que avalia a escassez de recursos primários, no caso o petróleo, a toxicidade humana e acidificação apresentaram os maiores níveis, que são apresentados na figura 25.

Figura 25 – Comparação de níveis de impacto normalizado



Fonte: adaptado PÉREZ, 2018.

Em todas as categorias analisadas por Pérez (2018), o óleo Therminol®VP-1 atingiu os maiores níveis de impacto, principalmente por conta do Éter difenílico, principal composição do óleo. E em relação aos sais, o que apresentou melhores resultados ambientais foi o Sal Hitec®.

As dificuldades no uso dos sais fundidos como HTF estão relacionadas às suas elevadas temperaturas de trabalho (KALOGIROU, 2009), como o discutido no tópico 4.1. Manter o sal em estado fundido ao longo das centenas de metros dos dutos receptores é um desafio que deve ser vencido, visto as suas vantagens ambientais.

As usinas que utilizam o TES direto, onde o sal também é usado como HTF, são do tipo receptor central e apresentam os melhores resultados ambientais entre as tecnologias CSP, como o apontado por (MAZZAFERRO, 2017) ao comparar a CSP Receptor Central com a Linear Fresnel e Cilindro Parabólico. Todavia, o uso de óleo como HTF interfere negativamente nos indicadores ambientais, e acima de certa escala de potência instalada, onde é requerido óleo como HTF, o impacto ambiental da Usina aumenta mais do que a sua produção de eletricidade.

5 CONCLUSÃO

A tecnologia CSP vem ganhando espaço significativo em pesquisa e desenvolvimento, e já deixou de ser exclusividade da Espanha e Estados Unidos. Esses constantes avanços tecnológicos empregados em diferentes Usinas CSP pelo mundo garantem um futuro promissor para essa fonte.

No Brasil não é diferente, e já existe projeto em desenvolvimento para implantação de Usina comercial CSP, espera-se com isso que a tecnologia amadureça e possa se tornar mais popular. Uma vez que suas vantagens para o Sistema Interligado Nacional – SIN são várias, especialmente devido à possibilidade de controlar a geração com os armazenadores calor – TES.

A constante diversificação do SIN aponta para mudanças na matriz de energia elétrica brasileira, antes dominada pelas fontes hídricas, e que agora encontram impedimentos para sua expansão. As vantagens das Usinas Hidroelétricas – UHE associadas aos grandes reservatórios já não fazem parte dos projetos em implantação ou em fase de viabilidade. Isso porque os prejuízos ambientais associados aos reservatórios são muito grandes, pois exigem o desmatamento e evacuação de grandes áreas, muitas em regiões de preservação ambiental.

Por outro lado, mas também com cenário não promissor, as Pequenas Centrais Hidroelétricas necessitam de pouco ou nenhum reservatório, mas com isso perde a capacidade de controlar sua geração, e fica diretamente dependente dos fluxos de chuvas cada vez menos previsíveis, o que dificulta o controle e atendimento da crescente demanda por energia elétrica no Brasil. E os reflexos são sentidos sempre que a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL autoriza a cobrança das bandeiras, onde o consumidor é penalizado pela falta de chuvas.

Demais fontes de geração elétrica como a solar fotovoltaica e eólica, mesmo sendo de grande potencial e vantajosa para o SIN, estão associadas à imediata disponibilidade de seus recursos, a radiação solar e os ventos. Diferente da CSP que direciona sua produção de eletricidade para os períodos de pico com o uso dos armazenadores de calor – TES. Ou seja, ofereceria ao Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS condições semelhantes as das UHE.

Para tanto, é importante que sejam realizados estudos mais abrangentes sobre a viabilidade de implantação de Usinas CSP no Brasil. Visto que foram apresentados ao longo dessa monografia diversos dados, em sua totalidade relacionando o potencial de geração com

os níveis de radiação solar direta. Todavia, estes não devem ser os únicos parâmetros considerados.

Como visto no capítulo 4, os fatores de impacto ambientais devem fazer parte dos indicadores de viabilidade, e estes também estão relacionados com regionalidades, ainda mais quando consideradas as proporções continentais do Brasil. Avaliando os indicadores ambientais como limitantes para a implantação de Usinas CSP, o SIN estaria assumindo importante compromisso ambiental com o país, e com isso contribuindo diretamente com a construção de uma matriz de energia elétrica sustentável.

O ciclo de vida e impacto ambiental de uma Usina CSP está associado em sua maioria à fase de construção da planta, isso porque é exigido grande quantidade de minérios como o cobre e o cromo, e de materiais como o concreto que utilizam energia de fontes fósseis em seu processo de beneficiamento.

Como alternativa a diminuição dos danos ambientais associados à Usina CSP é importante que sejam feitas mudanças nesses processos de beneficiamento, assim como estudadas novas tecnologias que permitam reduzir a quantidade de insumos necessários para a construção de uma planta.

Outra importante linha de pesquisa necessária é quanto à ampliação do uso de sais fundidos como HTF, ou mesmo o amadurecimento da tecnologia com TES direto. Visto que durante a fase de operação o uso do óleo térmico como HTF é o principal responsável pelos indicadores de impacto ambiental, assim como os riscos associados ao seu uso, como incêndio e vazamentos.

Sendo assim, a sugestão para estudos futuros é a construção de um mapa dos impactos ambientais e do ciclo de vida da tecnologia CSP no Brasil. Através do qual seriam levantadas informações sobre quais tecnologias CSP seriam mais adequadas para as condições climáticas e ambientais do Brasil, no sentido de maximizar a produção de eletricidade e minimizar os impactos ambientais, que para tecnologia CSP está associada principalmente a fase de construção e tipo de fluido térmico empregado como HTF.

REFERÊNCIAS

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

BRANCALIÃO, Nathan F. S. **Sistemas heliotérmicos**: recuso solar, tecnologia e infraestrutura. 2015. 58 f. Monografia – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

CARVALHO, Cássio Cardoso. **Fontes heliotérmicas: um estudo sobre o funcionamento e o potencial de implementação no Brasil**. 2016. 54 f. Monografia – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

CASTRO, Gabriel Malta. **Avaliação do valor da energia proveniente de usinas heliotérmicas com armazenamento no âmbito do Sistema Interligado Nacional**. 2015. 86 f. Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro/ COPPE, Rio de Janeiro, 2015.

DERROSSO, Giuliano Silveira; ICHIKAWA, Elisa Yoshie. A construção de uma usina hidrelétrica e a reconfiguração das identidades dos ribeirinhos: um estudo em Salto Caxias, Paraná. **Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 3, p. 97-114, jul-set. 2014.

EASTMAN Chemical Company Corporate Headquarters. **Datasheet THERMINOL®VP-1**. Disponível em: <http://emnmktassets.blob.core.windows.net/therminol/TF09A_Therminol_VP1.pdf>. Acesso em: 31 mar 2019.

ELETROSUL. Usina Termossolar de Laguna (SC). **Assessoria de Imprensa**. 2018. Disponível em: <<http://www.eletrosul.gov.br/destaque/usina-termossolar-de-laguna-sc>>. Acesso em 17 out 2018.

EUSTÁQUIO, João Vasco Cegonho de Sousa. **Simulação e análise do comportamento do campo de heliostatos de uma central de concentração solar termoeleétrica de receptor central**. 2011. 76 f. Dissertação – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.

FAPESP. Disponível em: <<http://agencia.fapesp.br/deficit-de-chuvas-no-brasil-vem-aumentando-nas-ultimas-decadas/21532/>>. Acesso em 17 out 2018.

HIJAZI, Hamza et al. Mechanical design of a low cost parabolic solar dish concentrator. **Alexandria Engineering Journal**. Volume 55, Issue 1, 2016, Pages 1-11. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S111001681600034X> >. Acesso em 17 out 2018.

KALOGIROU, Soteris. **Solar energy engineering**: processes and systems. United States: Elsevier, 2009.

KORONEOS, et al. Life cycle assessment of a solar thermal concentrating system. In: **Proceedings of the Selected Papers from the WSEAS Conferences**, Cantabria, Spain. 2008. Disponível em: < <https://pdfs.semanticscholar.org/af9d/31f5147b5abb43c5c417340ad8690d2645f1.pdf>>. Acesso em 28 maio 2019.

KRAEMER, Susan. **Solar For After Dark: How CSP Works**. 2016. Disponível em: <<https://cleantechnica.com/2016/10/31/how-csp-works/>>. Acesso em 14 out 2018.

LODI, Cristiane. **Perspectivas para a geração de energia elétrica no Brasil utilizando a tecnologia solar térmica concentrada**. 2011. 127 f. Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro/ COPPE, Rio de Janeiro, 2011.

MALAGUETA, Diego C. **Geração heliotérmica: princípios e tecnologia**. Eletrobras, Rio de Janeiro, 2012. 43 f.

MATINHO, Havana Alicia de Moraes Pimentel. Estados Unidos: o contexto dos anos 1970 e as crises do petróleo. **Revista História em Reflexão**. V. 4, n. 7, p. 1-10, jan-jun. 2010.

MAZZAFERRO, Cinzia Alberti. **Life Cycle Assessment of Electricity Production from Concentrating Solar Thermal Power Plants**. 2017. 74 f. Dissertação – Università Degli Studi di Padova, Padova, 2017.

MELO, Isabela Esterminio de Melo. **As crises do petróleo e seus impactos sobre a inflação do Brasil**. 2008. 34 f. Monografia – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MINISTÉRIO de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2017**: relatório síntese. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Rio de Janeiro, 2017. 61 f.

OLIVEIRA FILHO, Cássio Mauri de. **Metodologia para estudo de implantação de uma usina heliotérmica de receptor central no Brasil**. 2014. 87 f. Monografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro/ Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2014.

ONS. **Plano da operação energética 2017/2021 PEN 2017**. Rio de Janeiro, 2017. 41 f.

PÉREZ, Francisco Javier et al. Life cycle assessment of the fluids used in a concentrated solar power plant. **AIP Conference Proceedings**. Volume 2033, doi 10.1063/1.5067197, 2018, Pages 190012. Disponível em: < <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5067197>>. Acesso em 31 mar 2019.

POULLIKKAS, Andreas. Disponível em: < https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-operation-of-linear-Fresnel-reflector-solar-system-5_fig4_258402998>. Acesso em: 14 out 2018.

RAGHEB, M. **Historical Perspective**. University of Illinois at Urbana-champaign, Estados Unidos, 2011. Disponível em: <https://www.solarthermalworld.org/sites/gstec/files/story/2015-04-18/solar_thermal_power_and_energy_storage_historical_perspective.pdf>. Acesso em 17 out 2018.

RIOGLASS. **Receiver Tubes for Linear CSP (Concentrated Solar Power) Applications**. Disponível em: <<http://rioglass.com/hce-tubes/>>. Acesso em: 14 out 2018.

TEW, Fran. **Three Types of Concentrating Solar Panel Systems**. 2016. Disponível em: <<http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/tew2/>>. Acesso em: 17 out 2018.

THE ECONOMIST. **The 50 years under OPEC have been eventful**. 2010. Disponível em: <<https://www.economist.com/graphic-detail/2010/09/14/crisis-and-collusion>>. Acesso em 13 out 2018.

TORRESOL. Disponível em: <http://torresolenergy.com/en/?sfid=4868&_sft_tipo-de-multimedia=gemasolar-en>. Acesso em: 17 out 2018.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Solar Two Tower System**. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/solar/downloads/solar-two-tower-system>>. Acesso em 13 out 2018.

VIEBAHN, Piter et al. **Final report on technical data, costs, and life cycle inventories of solar thermal power plants**. New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS) Integrated Project, EU 6th Framework Programme, Brussels. Deliverable n 12.2-RS Ia. (2008).