

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL
Campus Ibirubá**

ESTÊVÃO MORAES ROSS

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
Estudo de um concentrador solar Fresnel linear**

**Ibirubá
2022**

ESTÊVÃO MORAES ROSS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
Estudo de um concentrador solar Fresnel linear

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Ciências Térmicas
Orientador: Alexandre Bittencourt de Sá

Ibirubá
2022

Ross, Estêvão M.

ESTUDO DE UM CONCENTRADOR SOLAR FRESNEL LINEAR /
Estêvão Moraes Ross; Orientador: Alexandre Bittencourt de Sá

Monografia (graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do
Rio Grande do Sul, Campus Ibirubá, Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Ibirubá
2022.

Estudo de um concentrador solar Fresnel Linear

Estêvão Moraes Ross

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Ibirubá, 15 de março de 2022.

Banca Examinadora:

Prof. Alexandre Bittencourt de Sá
IFRS campus Ibirubá

Prof. Bruno Conti Franco
IFRS campus Ibirubá

Prof. Pedro Augusto Fernandes Pereira
IFRS campus Ibirubá

RESUMO

O consumo energético nacional nos últimos 20 anos tem crescido de forma linear, a cada ano que passa a demanda energética é maior, portanto, se faz necessário o desenvolvimento de tecnologias para suprir esta demanda e evitar a dependência de fontes de energia não renováveis e ou sazonais. A busca por fontes de energia que não agridam o meio ambiente tem se intensificado nas últimas décadas, busca esta que é voltada principalmente para recursos renováveis. Neste viés algumas alternativas vêm surgindo, sendo elas energia eólica e energia solar, pois possuem abrangência em todo o território nacional, entretanto, existem regiões mais propícias que outras para a instalação de determinadas tecnologias. O crescente aproveitamento da energia solar, faz com que os estudos e a busca pelo barateamento destas tecnologias sejam cada vez mais explorados, em busca de um custo acessível e uma boa eficiência se comparada aos outros meios de obtenção de energia. Este trabalho será baseado no estudo de um concentrador solar Fresnel linear hipotético, que seria instalado na região Ibirubá - Rio Grande do Sul, serão desenvolvidas análises relativas à taxa de transferência de calor entregue ao fluido com base na irradiação direta local, a temperatura a qual o fluido térmico será submetido e a geração de vapor direta que o um concentrador solar Fresnel linear é capaz de entregar.

Palavras-chave: Energia. Concentrador. Vapor. Renovável.

ABSTRACT

The national energy consumption in the last 20 years has grown linearly, every year the energy demand is higher, therefore, it is necessary to develop technologies to meet this demand and avoid dependence on non-renewable and or seasonal energy sources. The search for energy sources that do not harm the environment has intensified in the last decades, a search that is mainly focused on renewable resources. Some alternatives are emerging, such as wind and solar energy, because they have coverage throughout the national territory, however, there are more favorable regions than others for the installation of certain technologies. The growing use of solar energy makes the studies and the search for the cheapening of these technologies to be increasingly explored, in search of an accessible cost and a good efficiency if compared to other means of obtaining energy. This work will be based on the study of a hypothetical linear Fresnel solar concentrator, which would be installed in the Ibirubá - Rio Grande do Sul region. Analyses will be developed regarding the heat transfer rate delivered to the fluid based on direct irradiation, the temperature to which the thermal fluid will be subjected and the direct steam generation that a linear Fresnel solar concentrator can deliver.

Key words: Energy. Concentrator. Steam. Renewable.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

LEPTEN – Laboratórios de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia

IAM - Modificador pelo ângulo de incidência

IAM_L - Modificador pelo ângulo de incidência longitudinal

IAM_T - Modificador pelo ângulo de incidência transversal

L_{col} - Comprimento do Fresnel

T_{amb} - Temperatura do ambiente

DNI - Irradiância Direta Normal (DNI)

DHI - Irradiância Difusa Horizontal (DHI)

GHI - A Irradiância Global Horizontal (GHI)

L_{st} - Longitude padrão para o fuso horário local

L_{loc} - Longitude do local

T_{HTF} - Temperatura do fluido

TMY - Typical Meteorological Year

h_{lv} - Entalpia de vaporização

LISTA DE SÍMBOLOS

θ_Z - ângulo de zênite solar

θ_L - ângulo de incidência solar longitudinal

θ_T - ângulo de incidência solar transversal

η_0 - eficiência óptica de pico

γ_s - ângulo de azimute solar

γ_{col} - ângulo de azimute do coletor

γ - ângulo de azimute

n - dia do ano

δ - declinação

\varnothing - Latitude

ω - ângulo hora

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Aumento da demanda/geração energética, Brasil 1970 – 2020 (Fonte: BEN, 2022)..... | 15 |
| Figura 2 - Evolução da estrutura da oferta de energia, Brasil 1970 – 2020. (Fonte: BEN, 2022)..... | 16 |
| Figura 3 - Fontes de energia em operação e em implementação (Fonte: ANEEL, 2017) | 17 |
| Figura 4 - Usina Hidrelétrica Típica (Fonte: PCH Paracambi) | 18 |
| Figura 5 - Usina de Itaipu (Fonte: ITAIPU, 2021) | 19 |
| Figura 6 - Usina de Belo Monte (Fonte: IBAMA, 2021) | 20 |
| Figura 7 - Parque eólico Lagoa dos Ventos (Fonte: VisãoGeo, 2021)..... | 21 |
| Figura 8 - Potencial eólico brasileiro (Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2013)..... | 22 |
| Figura 9 - Movimento da terra relativo ao Sol (Fonte: Só Geografia) | 23 |
| Figura 10 - Total diário da irradiação no plano inclinado na latitude, média anual (Fonte: Atlas solarimétrico do Brasil, 2017) | 24 |
| Figura 11 - Aplicações de energia solar (Fonte: Autor, 2022) | 25 |
| Figura 12 - Divisão Radiação solar (Fonte: Góis, 2020)..... | 26 |
| Figura 13 - Ano típico meteorológico (Fonte: Autor, 2022) | 36 |
| Figura 14 - Ângulos Solares (Fonte: Pigozzo, 2019) | 33 |
| Figura 15 - Ângulos complementares ao estudo (Fonte: Pigozzo, 2019)..... | 34 |
| Figura 16 -Célula fotovoltaica (Fonte: Portal Solar, 2020) | 27 |
| Figura 17 - Painéis solares (Fonte: USP, 2014)..... | 28 |
| Figura 18 - Concentrador Calha parabólica (Fonte: Sá, 2018)..... | 29 |
| Figura 19 - Concentrador Disco Solar (Fonte: Sá, 2018) | 30 |
| Figura 20 - Concentrador Torre solar (Fonte: Sá, 2018) | 31 |
| Figura 21 - Concentrador Fresnel Linear (Fonte: Sá, 2018)..... | 32 |
| Figura 22 - TMY após o tratamento de dados (Fonte: Autor, 2022)..... | 38 |
| Figura 23 - Concentrador solar Fresnel linear (Fonte: PIGOZZO, SÁ, SOUSA, PASSOS, 2018)..... | 42 |
| Figura 24 - Curvas IAMT e IAML (Fonte: Autor, 2022)..... | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 25 - Aplicação das equações Parte 1 (Fonte: Autor, 2022) | 46 |
| Figura 26 - Aplicação das equações Parte 2 (Fonte: Autor, 2022) | 46 |
| Figura 27 - Entrada de vapor (Fonte: Autor, 2022) | 51 |
| Figura 28 - Dados para cálculos (Fonte: Çengel, 2013) | 52 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA..... | 12 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 13 |
| 1.3 | ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 14 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2.1 | MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA..... | 15 |
| 2.2 | ENERGIAS RENOVÁVEIS | 17 |
| 2.3 | SOLAR..... | 23 |
| 2.3.1 | ANO TÍPICO METEOROLÓGICO (TMY) | 34 |
| 2.3.2 | RASTREAMENTO SOLAR | 33 |
| 2.3.3 | APROVEITAMENTO ENERGIA SOLAR | 27 |
| 2.3.4 | CONCENTRADORES SOLARES | 29 |
| 2.4 | VAPOR PARA PROCESSOS INDUSTRIAIS | 37 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 38 |
| 3.1 | PLANILHA DE RASTREAMENTO SOLAR..... | 38 |
| 3.2 | ANÁLISE ÓTICA E TÉRMICA DO CONCENTRADOR | 42 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 47 |
| 4.1 | IRRADIAÇÃO DIRETA | 47 |
| 4.2 | ENERGIA SOLAR QUE CHEGA AO CONCENTRADOR | 48 |
| 4.3 | ENERGIA SOLAR ENTREGUE AO FLUÍDO EM UM DIA | 49 |
| 4.4 | ANÁLISE DE CASO REAL | 51 |
| 5 | CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 55 |
| 6 | REFERÊNCIAS | 56 |

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas algumas fontes de energia renovável vêm se destacando, uma delas é a energia solar. Entretanto ainda existem questões relativas a custos altos que podem inviabilizar a instalação e aproveitamento dessas tecnologias. Contudo, diversos estudos para desenvolvimento e barateamento têm sido feitos com utilização de tecnologias de ponta.

A energia solar tem se destacado pela versatilidade no que diz respeito a geração, como exemplo, temos a energia heliotérmica, que é baseada no direcionamento da radiação solar incidente a um ponto de interesse. Dentre as técnicas de aproveitamento da energia heliotérmica, os concentradores solares do tipo Fresnel linear se destacam por serem versáteis, podendo desde aquecer algo desejado a partir de seu fluido térmico, e até mesmo entregar vapor de forma direta.

O estudo e desenvolvimento destas tecnologias é fundamental para o futuro da matriz energética nacional, tendo em vista que os recursos não renováveis tendem a se esgotar.

1.1 JUSTIFICATIVA

A queima de combustíveis fósseis para obtenção de energia é algo comum atualmente, como é o caso das usinas a carvão ou câmaras de combustão a gás, por exemplo. Apesar de ser usual, a utilização destes meios para obtenção energia acarreta grandes impactos ao meio ambiente.

Tendo em vista os problemas climáticos decorrentes do aquecimento global, a preocupação com o meio ambiente vem à tona, justificando o estudo e desenvolvimento de meios de obtenção de energia de forma relativamente limpa e sustentável. É neste viés em que as energias renováveis estão sendo cada vez mais visadas, e por consequência estudadas e desenvolvidas tanto no meio acadêmico quanto em aplicações reais.

1.2 OBJETIVOS

Geral:

Estudo da tecnologia do concentrador solar Fresnel linear.

Específicos:

Fazer uma revisão bibliográfica sobre energia solar e o estado da arte de concentradores solares.

Estudar as particularidades do concentrador solar Fresnel linear.

Analisar um ano típico meteorológico para a região de Ibirubá

Desenvolver as equações de rastreamento solar para os principais ângulos solares.

Implementar uma análise ótica e térmica de um concentrador Fresnel linear específico.

Analisar os resultados de geração de vapor para um concentrador.

Estimar a produção de vapor de múltiplos concentradores para suprir uma demanda industrial.

Analisar a possibilidade de implementação com base em dados reais de um processo industrial.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco capítulos de forma a facilitar a estruturação e o entendimento do conteúdo.

O segundo capítulo é uma revisão bibliográfica que abrange a matriz energética brasileira, os principais tipos de energias renováveis, um subcapítulo especial para tratar a energia solar, ano típico meteorológico, rastreamento solar, alguns meios para aproveitamento da energia solar e concentradores solares e por fim vapor para processos industriais.

No terceiro capítulo será demonstrada a metodologia utilizada para desenvolver o trabalho, iniciando com uma planilha de rastreamento solar e partindo para análises óticas e térmicas do concentrador solar Fresnel linear.

O quarto capítulo é voltado para os resultados e a discussão, iniciando com a irradiação direta na região, em seguida a energia solar que chega até um concentrador solar Fresnel linear, a energia solar que é absorvida pelo fluido térmico e por fim a análise de um caso real.

No quinto capítulo serão feitas as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

No sexto capítulo estão as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No capítulo a seguir serão abordados os temas principais que tangem o trabalho em questão.

2.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Ao longo do século XX o Brasil passou por um grande desenvolvimento econômico, que culminou em uma crescente demanda de energia primária. Alguns dos fatores que tem grande influência neste processo são a industrialização e a notável expansão demográfica nacional (TOLMASQUIM, GUEREIRO, & GORINI, 2007).

A partir da década de 1970, observou-se um crescimento acentuado da demanda energética brasileira, como pode ser observado na Figura 1.

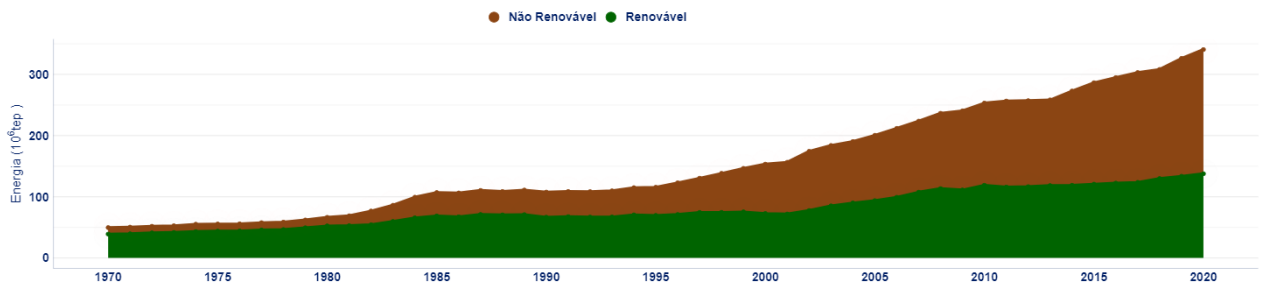


Figura 1 - Aumento da demanda/geração energética, Brasil 1970 – 2020 (Fonte: BEN, 2022)

O consumo de energia elétrica também possui crescimento quase que contínuo no Brasil, apesar da evolução de equipamentos com maior eficiência energética, há uma crescente também na utilização de aparelhos elétricos. Existe a necessidade do crescimento na geração, transmissão e distribuição desta energia, o que geralmente não ocorre na mesma velocidade do consumo, em função das faltas de planejamento ou investimentos adequados, podendo gerar déficit no abastecimento energético o que pode resultar em racionamento, elevação de preço e cortes temporários no fornecimento de energia elétrica (BARDELIN, 2004).

Entre 2001 e 2002 houve o maior racionamento de energia elétrica da história Brasileira, devido a uma grande escassez de chuvas, e um baixíssimo nível dos reservatórios

das hidrelétricas, houve diversos apagões em várias regiões do país, e impactos e diversos outros setores produtivos. Este período ficou conhecido como a crise de 2001.

Foi a partir desta que crise que houve um aumento acentuado na busca pela diversificação da matriz energética/elétrica nacional, como pode-se observar na Figura 2. Este aumento decorre também do projeto de lei 630/2003, onde era proposto a constituição de um fundo especial para financiar pesquisas e fomentar a produção de energia elétrica e térmica a partir da energia solar e da energia eólica, e dá outras providências.

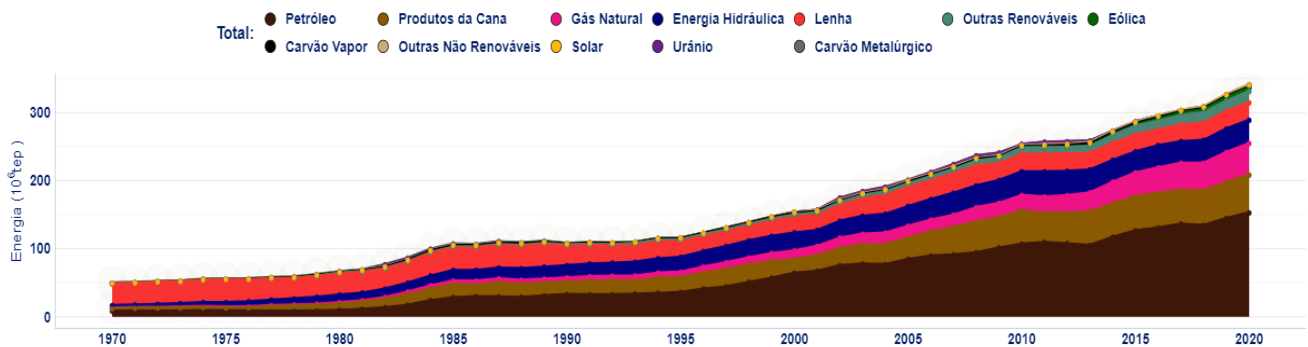


Figura 2 - Evolução da estrutura da oferta de energia, Brasil 1970 – 2020. (Fonte: BEN, 2022)

A perspectiva para os próximos anos é que haja um crescimento de outras fontes de energia, e que a hidroeletricidade perda espaço, pois prevê-se a saturação de usinas nas regiões de importância bem como tem-se perspectivas de cenários cada vez mais críticos nos níveis pluviométricos do país (TOLMASQUIM, GUEREIRO, & GORINI, 2007).

2.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS

A matriz elétrica Brasileira é constituída basicamente de fontes renováveis de energia, sendo a energia hídrica a que entrega a maior porção energética, porém, outras fontes vêm tomando força com o passar anos, estas possuem forte potencial para suplementar a demanda de energia elétrica nacional (ARAÚJO & GOES, 2009).

Atualmente, 854 novas usinas outorgadas devem agregar 25,6 GW em capacidade instalada (ANEEL, 2017). A Figura 3 nos mostra as mudanças previstas para a matriz elétrica nacional, e o percentual de que cada fonte de energia está se desenvolvendo relativo aos 25,6 GW de ampliação de geração.

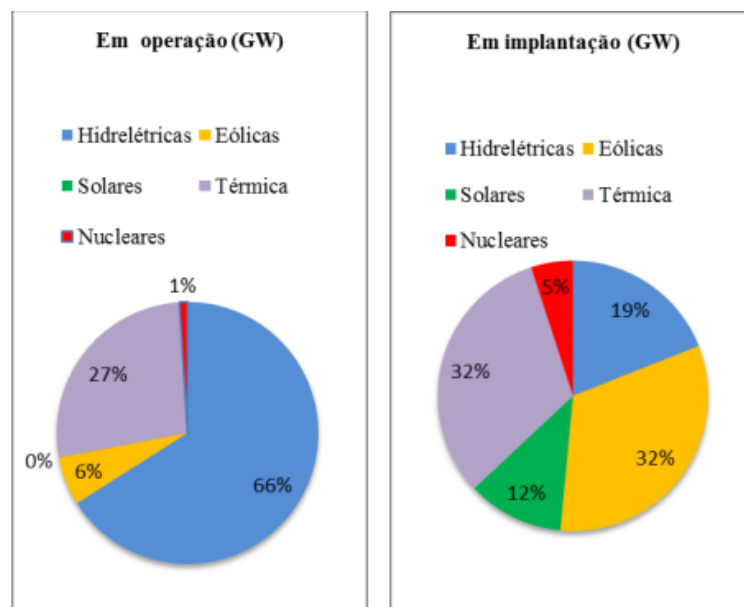


Figura 3 - Fontes de energia em operação e em implementação (Fonte: ANEEL, 2017)

A seguir falaremos das duas principais fontes de energia renovável do país, a energia hídrica que é responsável pela geração da maior parcela de energia renovável do país e energia eólica que possui um potencial altíssimo para desenvolvimento, principalmente na região nordeste do país.

Apesar da sazonalidade da energia hídrica, há uma tendência de crescimento da exploração deste meio de geração energética, como já podemos observar as construções de novas usinas hidrelétricas na região norte do país e os incentivos para implantação de

pequenas centrais hidrelétricas (CASTRO, DANTAS, LEITE, BRANDÃO, & TIMPONI, 2010).

A energia hídrica consiste no aproveitamento da energia cinética e potencial da água para conversão em energia mecânica, e por fim, a energia mecânica é convertida em energia elétrica. Para isto, são construídas barragens que tem como objetivo converter as energias potenciais e cinéticas através da condução do fluido por dutos que farão a movimentação de turbinas hidráulicas, as turbinas entregarão energia mecânica a uma série de geradores que serão os responsáveis pela conversão de energia mecânica em energia elétrica.

A entrega de energia de uma usina hidroelétrica é proporcional ao produto do volume de fluido que passa pelas turbinas e pela altura líquida de queda, que corresponde a diferença o nível do reservatório e o nível do canal de fuga, as perdas hidráulicas também devem ser consideradas. A produção de energia elétrica é limitada pela potência do gerador (KELMAN & PEREIRA). Um esquema simplificado de uma usina hidrelétrica típica pode ser observado na Figura 4.

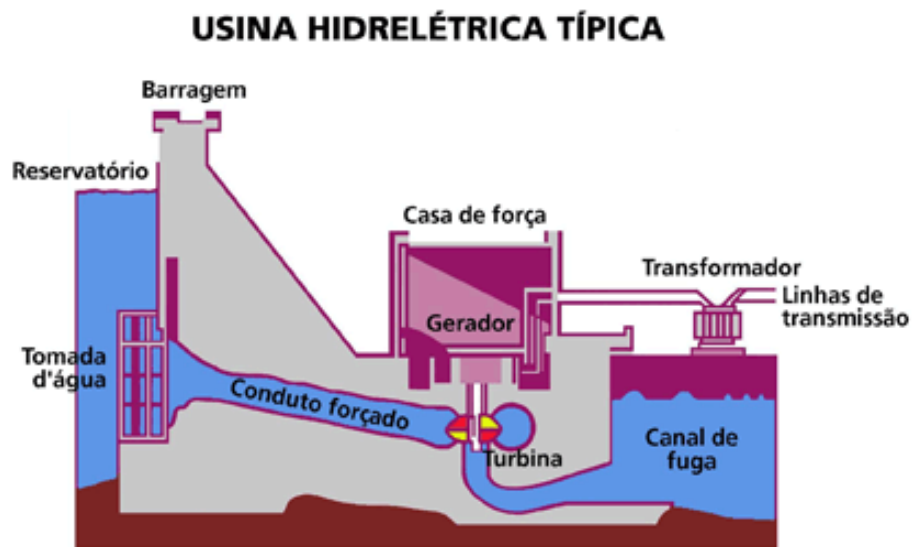


Figura 4 - Usina Hidrelétrica Típica (Fonte: PCH Paracambi)

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2021, as usinas hidrelétricas, estão responsáveis por 65,2% da produção de energia elétrica. Essa predominância da energia hídrica no Brasil se vale do fato do país possuir enormes reservas hídricas, abrangendo todo o território. Na Figura 5 podemos observar a usina de Itaipu, uma das maiores hidrelétricas do

mundo em potência instalada, são 14 GW, distribuídos em 20 unidades geradoras de 20 MW cada.



Figura 5 - Usina de Itaipu (Fonte: ITAIPU, 2021)

Além da dependência das chuvas, as hidrelétricas mesmo sendo fontes renováveis de energia, geram impactos ambientais quando se fala em implantação, devido a inundação de grandes áreas, para o acúmulo de água no reservatório.

Entretanto mesmo com o problema citado, o Brasil continua a investir em novas usinas hidrelétricas, exemplo é a construção de Belo Monte, que atualmente é a segunda maior usina hidrelétrica nacional em potência instalada, gerando aproximadamente 11,2 GW, esta pode ser observada na Figura 6.



Figura 6 - Usina de Belo Monte (Fonte: IBAMA, 2021)

Desde 2002, com a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, o desenvolvimento de tecnologias para aproveitamento de energia eólica, energia solar e biomassa vem sendo fomentadas fortemente, até mesmo com incentivo financeiro junto ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), (FARIA, 2010).

Nos últimos anos uma fonte renovável que tem ganhado destaque no Brasil é a energia eólica, bem como os custos para implementação vem diminuindo, isso associado ao potencial eólico brasileiro, dão indícios que, a produção eólica poderá ocupar lugar de destaque na matriz energética brasileira, como já pode ser visto no primeiro semestre do ano de 2021, onde 83% do acréscimo de potência diz respeito a usinas eólicas (GOVERNO DO BRASIL, 2021). Na Figura 7 podemos observar o parque eólico de maior potência instalada do país, o Parque Lagoa dos ventos, com capacidade de 450 MW.



Figura 7 - Parque eólico Lagoa dos Ventos (Fonte: VisãoGeo, 2021)

O Brasil, por possuir um enorme território, apresenta várias regiões que favorecem a produção tanto de energia eólica (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007).

Contudo, para um aproveitamento mais eficiente dos ventos, são necessários alguns estudos a respeito do comportamento, principalmente quanto a sua velocidade e direção, a partir destes estudos, são tomadas as decisões técnicas que vai definir as características dos aerogeradores. A energia produzida por um aerogerador é função da densidade do ar, da área coberta pela rotação das pás e da velocidade do vento (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007).

O Atlas Eólico Brasileiro apresenta o comportamento dos ventos no país, a mais de 30 anos, os dados são coletados e expostos. A Figura 8 nos mostra um panorama da velocidade dos ventos no país, dados de simulações de 2013, onde os ventos variam de 4(regiões esverdeadas) a 13(regiões roxas) metros por segundo.

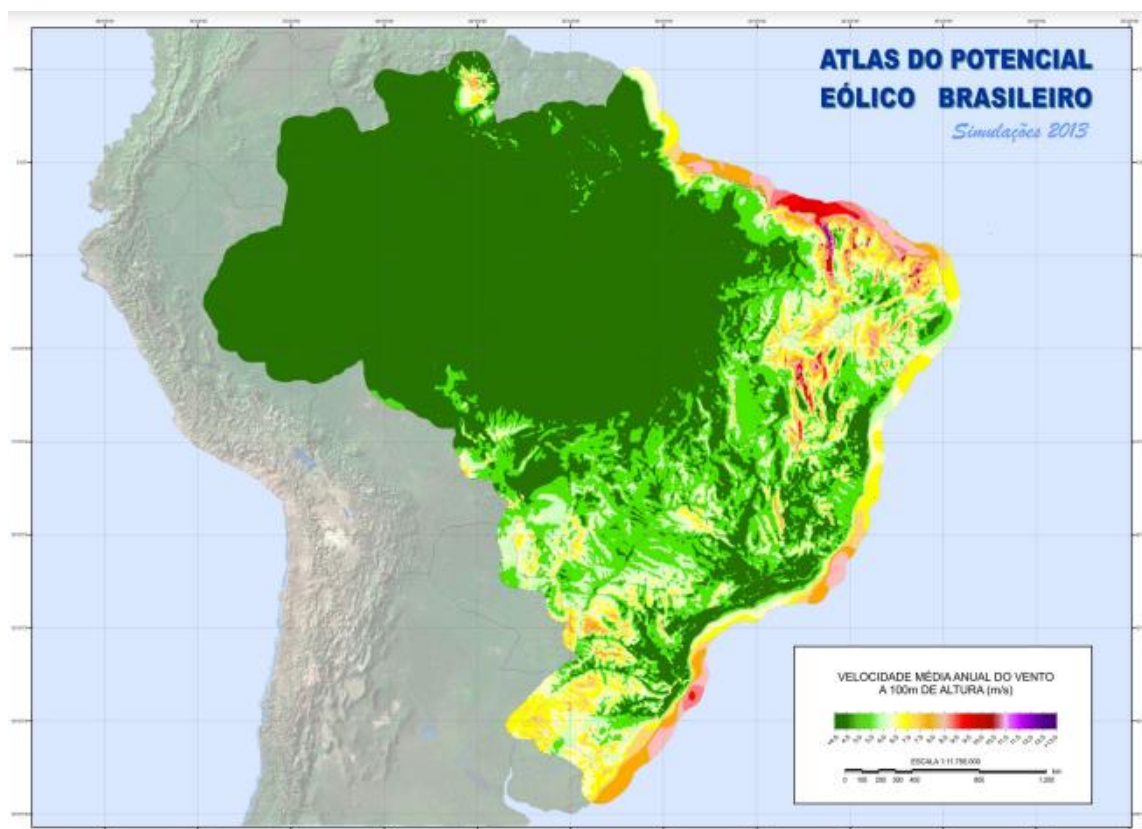


Figura 8 - Potencial eólico brasileiro (Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2013)

É possível perceber que as regiões mais favoráveis a implementação de parques eólicos é litorânea, concentrando as maiores velocidades dos ventos na região nordeste, onde logicamente se concentra a maior produção eólica nacional.

A energia eólica é uma fonte limpa de energia, entretanto, ela enfrenta alguns problemas como o alto custo de equipamentos, a falta de recursos humanos especializados e problemas causados pelo seu funcionamento (MARANHÃO, 2016).

A seguir será abordada a energia solar, que é tema deste trabalho. Este tipo de energia possui um alto potencial, entretanto, é pouco explorada se comparada as fontes de energia renovável já citadas.

2.3 SOLAR

A energia solar que chega à superfície da Terra é suficiente para atender 10.000 vezes o consumo de energia do mundo, segundo o Plano Nacional de Energia. A luz do sol é capaz de produzir cerca de 1.700 kWh por ano para cada metro quadrado de área.

Entretanto, para que possamos aproveitar este potencial energético se fazem necessários estudos a respeito da radiação direta e indireta incidente no local de interesse. A disponibilidade da radiação é determinada pela latitude, isso devido ao movimento da terra em torno do Sol, mostrado na Figura 9, que transita em um plano inclinado de aproximadamente de 23,5° com relação ao plano do Equador (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007).

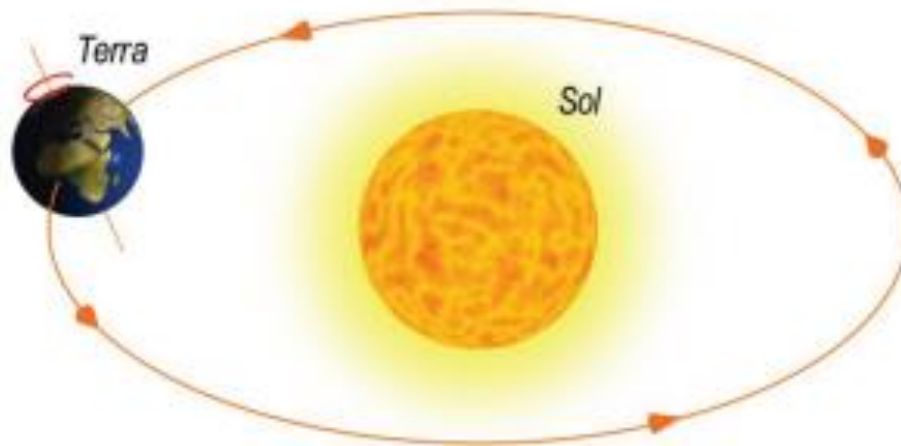


Figura 9 - Movimento da terra relativo ao Sol (Fonte: Só Geografia)

O estudo de maior relevância no país sobre as potencialidades solares é intitulado como Atlas Solar, onde são analisadas a intensidade de radiação em todo o território nacional, bem como a variação dela ao longo dos anos. Os resultados mostram que a irradiação solar no Brasil varia entre 3500 Wh/m².dia a 6250 Wh/m².dia, na Figura 10 podemos observar a irradiação e sua variação conforme as diferentes regiões do país.

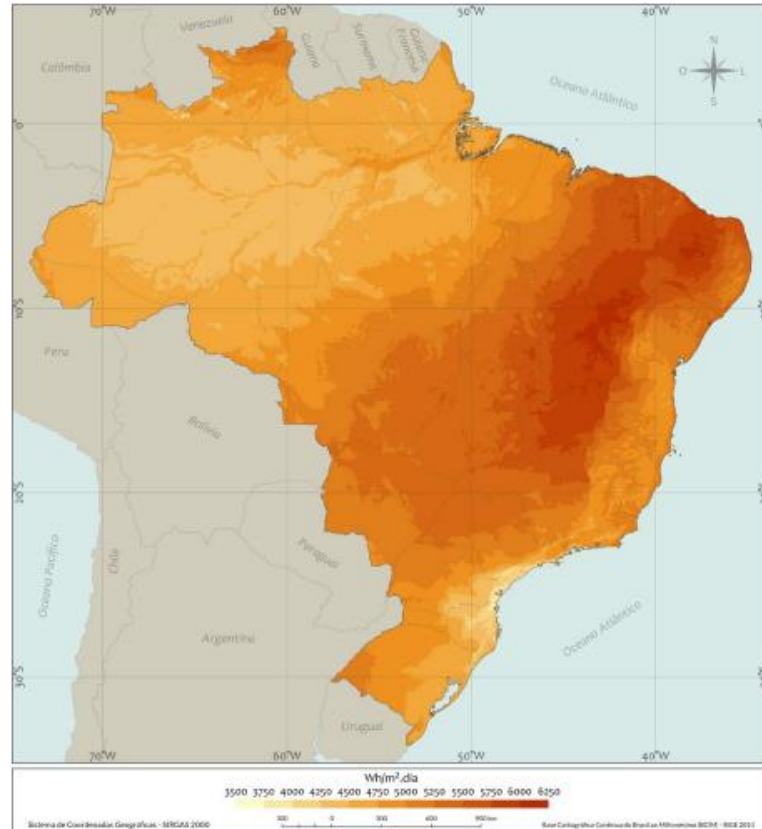


Figura 10 - Total diário da irradiação no plano inclinado na latitude, média anual (Fonte: Atlas solarimétrico do Brasil, 2017)

Existem formas de aproveitar a energia solar em todo o território nacional, e sua aplicação pode gerar benefícios ao país e os cidadãos, pois além da diversificação da matriz elétrica, esta forma de energia pode atender comunidades remotas onde o custo da eletrificação por meio da rede convencional é muito alto e não há interesse financeiro por parte dos concessionários em fazê-lo.

A energia solar se destaca por possuir diversas formas para aproveitamento do seu potencial, a Figura 11 nos mostra algumas aplicações, desde pequenos sistemas fotovoltaicos autônomos até grandes centrais que utilizam energia solar concentrada. Porém, mesmo com essas inúmeras opções a participação da energia solar na matriz energética e elétrica brasileira, é irrisória. Uma forma de aproveitamento que está ficando cada vez mais comum e pode ser vista com certa frequência em nosso dia a dia é a utilização de painéis fotovoltaicos.

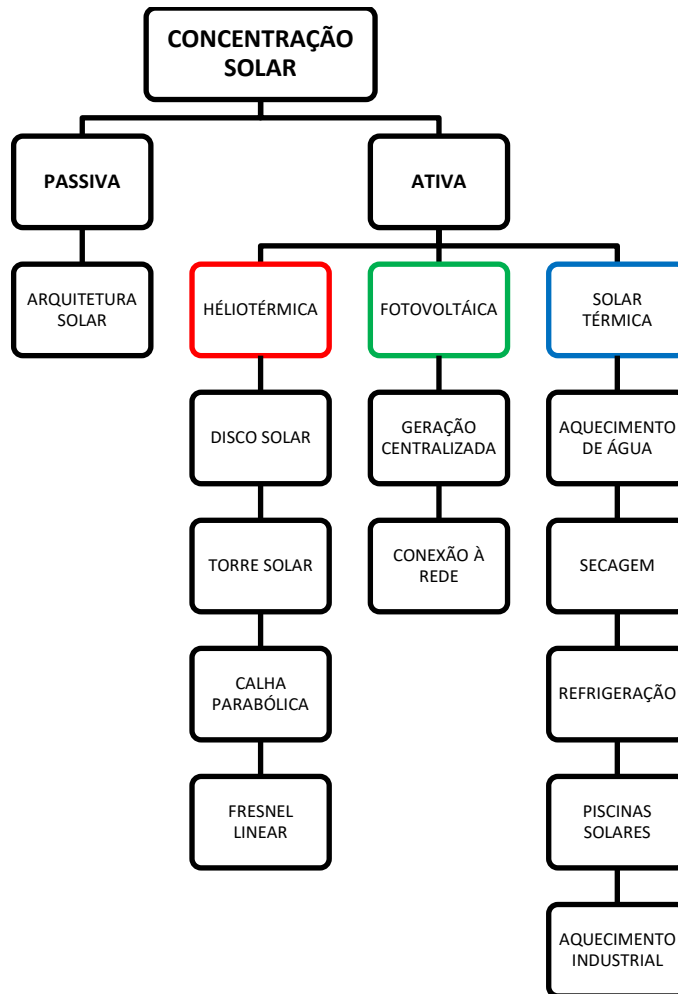


Figura 11 - Aplicações de energia solar (Fonte: Autor, 2022)

A radiação solar é o fluxo de energia emitida pelo Sol e transmitida sob a forma de ondas eletromagnéticas ao espaço. Estudos demonstram que o fluxo de radiação solar que chega a terra está próxima de 1365 W/m^2 , porém, estudos demonstram que podem haver variações em escalas de tempo de minutos até décadas (GÓMEZ, CARLESSO, VIEIRA & SILVA, 2018).

A radiação solar, ao entrar na atmosfera terrestre passa pelos processos de espalhamento e absorção. Em razão do espalhamento, podemos dividir a radiação solar incidente sobre uma superfície em três componentes, irradiação direta, irradiação difusa e a irradiação global, que é a soma das anteriores (VALIATI & RICIERI, 2005).

A Irradiância Direta Normal (DNI) incide diretamente em uma superfície perpendicular ao Sol, e passa diretamente pela atmosfera até o solo, sem nenhum desvio. A Irradiância Difusa Horizontal (DHI) sofre desvios em sua trajetória até a superfície terrestre, somente após os desvios ela encontra a superfície. A Irradiância Global Horizontal (GHI) é a

soma das componentes de radiação solar direta (DNI) e difusa (DHI). A Figura 12 nos mostra ambas as formas de irradiação aproveitáveis.

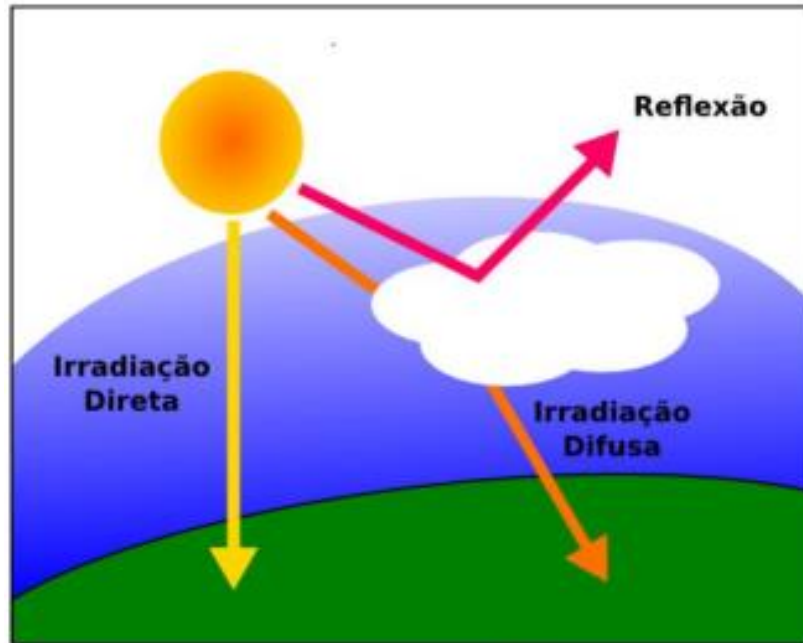


Figura 12 - Divisão Radiação solar (Fonte: Góis, 2020)

Para este trabalho a irradiação de interesse é a componente direta, pois apenas ela pode ser focada no absorvedor, devido a sua orientação. A componente difusa é refletida para todo o ambiente.

2.3.1 APROVEITAMENTO ENERGIA SOLAR

Existem dois tipos principais de conversão da energia solar: a fotovoltaica e a heliotérmica.

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez no século XIX, mais especificamente em 1839, onde Edmond Becquerel observou que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito geram uma diferença de potencial quando expostas à incidência de luz. (CÂMARA, 2011).

Hoje a energia fotovoltaica é gerada a partir da conversão direta de radiação solar em eletricidade, onde a célula fotovoltaica, dispositivo fabricado de material semicondutor, mostrado na Figura 13, tem papel principal nesta conversão (MARANHÃO, 2019).



Figura 13 -Célula fotovoltaica (Fonte: Portal Solar, 2020)

Em questões ambientais a energia fotovoltaica é pouco agressiva se comparada a outras fontes de energias renováveis, como a hidroeletricidade por exemplo, isto se dá em razão de não possuir necessariamente redes gerais para transporte e distribuição da energia. Entretanto, a energia fotovoltaica possui perigos no que se refere a produção dos painéis fotovoltaicos, que pode vir a utilizar elementos tóxicos. Outra preocupação é o descarte dos painéis fotovoltaicos ao final da vida útil, que se efetuado de forma inadequada pode vir a

causar contaminação ambiental (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2007). Na Figura 14 podemos observar uma estrutura com diversos painéis solares.



Figura 14 - Painéis solares (Fonte: Universidade de São Paulo, 2014)

Já a energia heliotérmica, pode ser aproveitada de diferentes maneiras, seja na absorção da irradiação direta e difusa em absorvedores de placa plana, ou na concentração da irradiação direta em absorvedores lineares ou pontuais. Os absorvedores lineares e pontuais são caracterizados pela concentração da irradiação direta em um absorvedor, o qual possui em seu interior um fluido térmico, que pode ser um tipo específico de óleo, ou água que percorrem os tubos absorvedores para o fim ao qual se destinam, seja a produção direta de vapor ou aquecimento de algo (PIGOZZO, 2019).

Como o trabalho em questão é voltado para um concentrador solar do tipo linear, o próximo tópico abordará alguns dos tipos de concentradores solares que se baseiam no aproveitamento da energia heliotérmica.

2.3.2 CONCENTRADORES SOLARES

Existem dois principais tipos de concentradores solares, pontuais e os lineares, como exemplo de concentradores solares pontuais serão descritos os modelos Disco Solar e Torre solar, já dos concentradores solares lineares serão abordados a Calha Parabólica e o Fresnel Linear, tema do trabalho.

O concentrador do tipo Calha parabólica possui um espelho parabólico que concentra a radiação num receptor, localizado no foco da parábola. A calha parabólica possui um mecanismo de seguimento de um eixo que normalmente segue o movimento do sol de leste a oeste, com os concentradores orientados no eixo norte-sul. Uma calha parabólica pode ser observada na Figura 15.

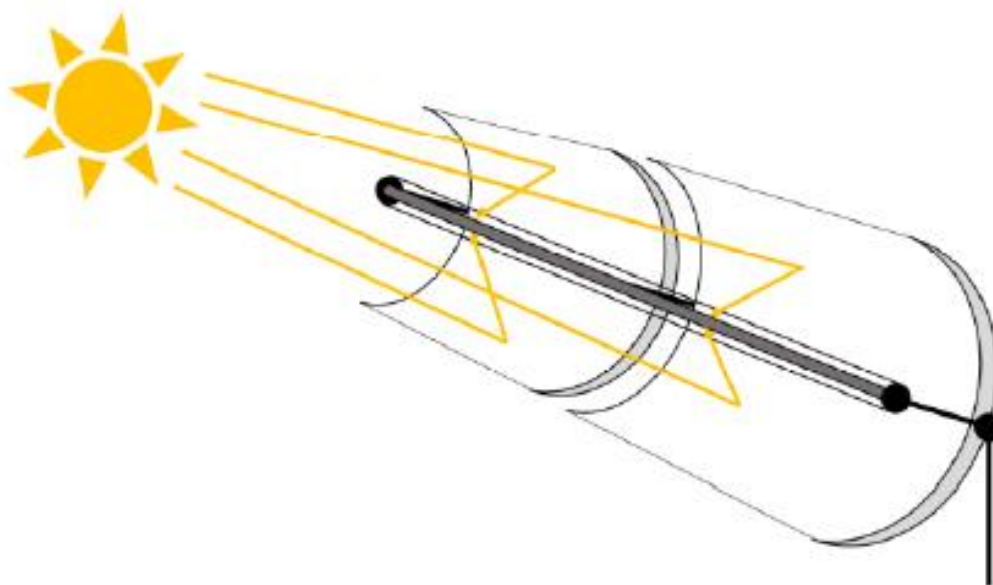


Figura 15 - Concentrador Calha parabólica (Fonte: Sá, 2018)

O concentrador solar Disco solar têm o aspecto de antenas parabólicas, ele concentra toda a radiação incidente em seu espelho parabólico à um receptor montado no seu foco. Estes sistemas de alta concentração podem alcançar temperaturas de cerca de 1500 °C. O concentrador é composto por um disco parabólico que segue o sol em dois eixos. Um Disco Solar pode ser observado na Figura 16.

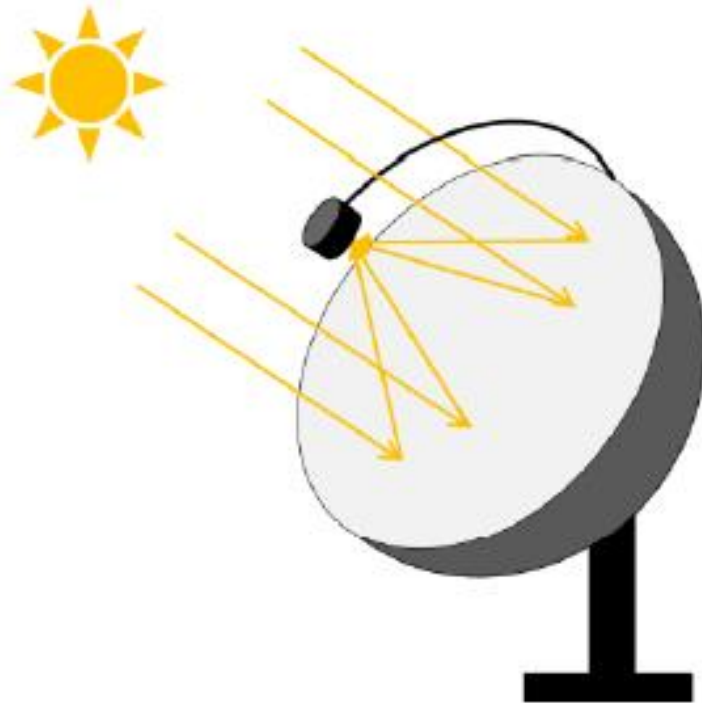


Figura 16 - Concentrador Disco Solar (Fonte: Sá, 2018)

O concentrador Torre solar é composto por uma torre central com altura geralmente entre 75 e 150 metros, com o receptor montado no seu topo. A torre está localizada no centro de um campo solar, composto por heliostatos. Estes heliostatos são espelhos planos que seguem o sol em dois eixos, cada um com uma área de 8 a mais de 100 m², distribuídos à volta da torre solar, estes possuem o papel de direcionar a irradiação para o receptor. As torres solares também possuem altas taxas de concentração solar, permitindo-lhe atingir temperaturas superiores a 800 °C. Uma Torre Solar pode ser observada na Figura 17.

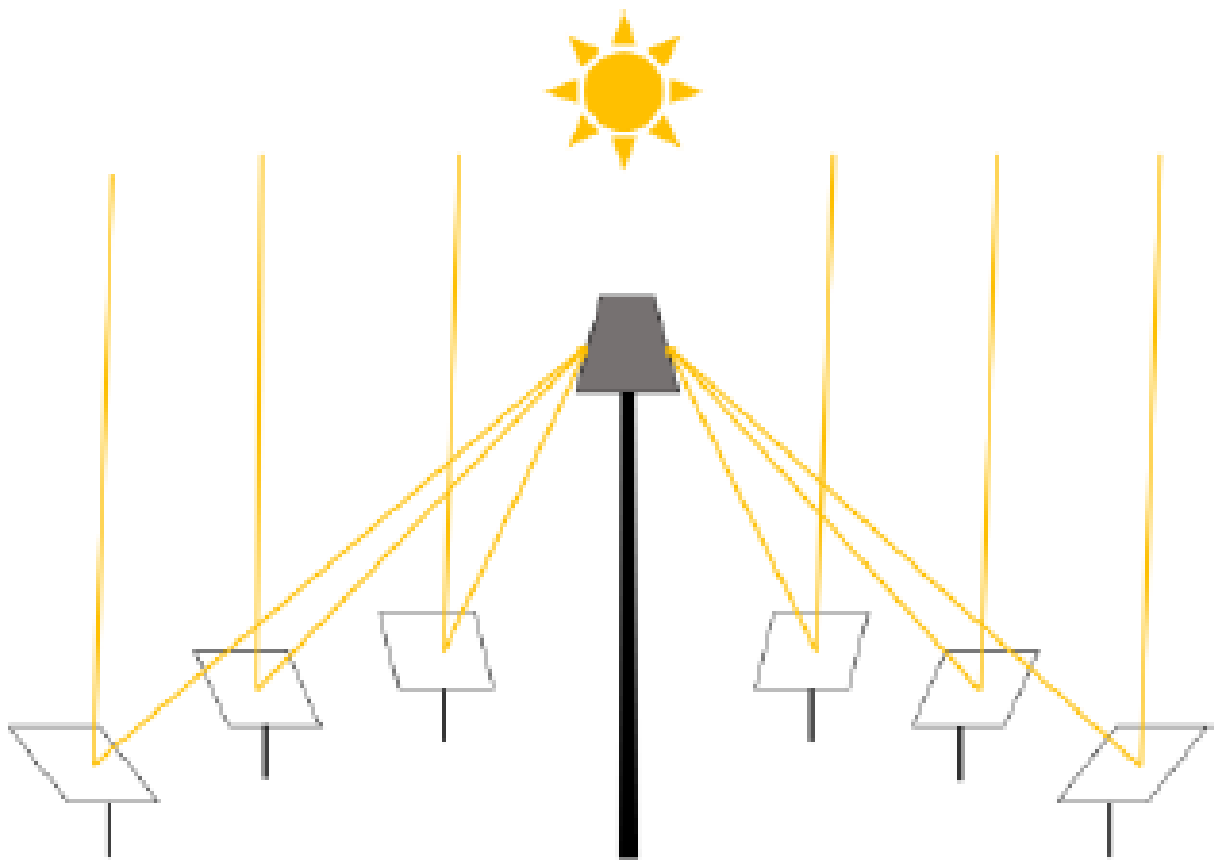


Figura 17 - Concentrador Torre solar (Fonte: Sá, 2018)

O concentrador solar Fresnel Linear funciona como uma Calha Parabólica que teve o seu espelho parabólico dividido em várias linhas de espelhos planos ou ligeiramente curvos (PIGOZZO, 2019).

Nesta tecnologia, existem várias linhas de espelhos localizadas próximas ao solo, que direcionam a irradiação solar direta para um conjunto de tubos absorvedores localizados acima dos espelhos, nestes tubos absorvedores ocorre o escoamento do fluido térmico, que ao

ser aquecido tende a mudar de fase. Variando as propriedades e parâmetros do concentrador podem ser obtidos diferentes resultados, como a geração direta de vapor ao elevar a temperatura do fluido até a saturação, ou o aquecimento do fluido sem mudança de fase.

A Figura 18 mostra um concentrador linear com 8 linhas de espelhos. Os espelhos, situados no mesmo plano, refletem a radiação solar incidente para os tubos absorvedores. A energia térmica absorvida pelas paredes dos tubos absorvedores é transferida ao fluido de trabalho, e este é direcionado a um separador de vapor onde o fluxo bifásico é dividido.

Geralmente a orientação para se instalar coletores é no eixo norte-sul, onde os espelhos rastreiam o sol, girando em um eixo, de leste a oeste.

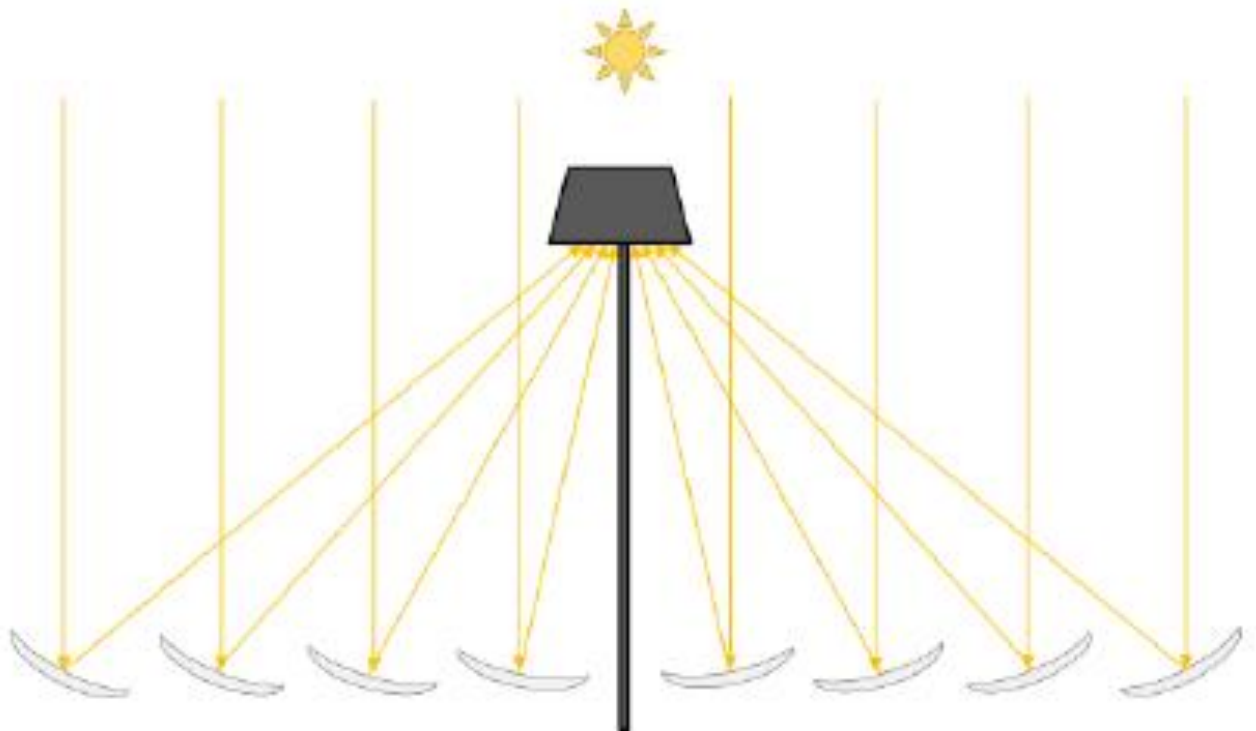


Figura 18 - Concentrador Fresnel Linear (Fonte: Sá, 2018)

Estes sistemas podem ter uma geometria de espelhos mais simples, e em tese mais fáceis e baratas de fabricar, se comparado aos concentradores citados anteriormente.

Geralmente o fluido térmico utilizado é um óleo térmico, quando o objetivo é fazer o aquecimento de algo. Contudo, pode-se utilizar água quando se deseja geração direta de vapor.

2.3.3 RASTREAMENTO SOLAR

O rastreamento solar aplicado aos concentradores solares tem por objetivo proporcionar a maior eficiência possível na absorção da energia solar, de modo que as superfícies absorvedoras dos concentradores de placa plana e os espelhos que direcionam a radiação direta para os absorvedores dos concentradores solares pontuais e lineares, se mantenham perpendiculares ao sol. O conhecimento da posição do sol é de suma importância para o desenvolvimento do sistema de rastreamento solar.

A posição do sol é definida pelos ângulos de azimute solar e zênite solar, que podem ser observados na Figura 19.

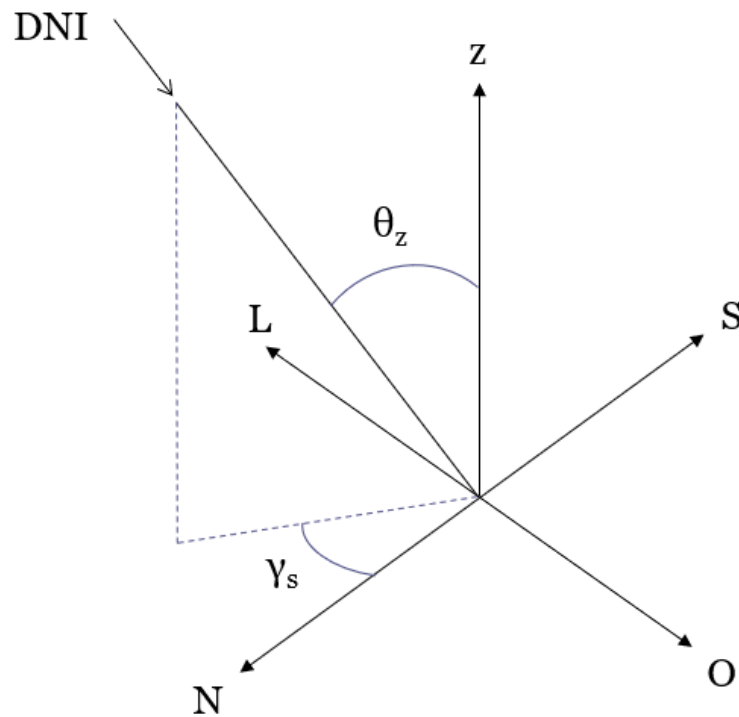


Figura 19 - Ângulos Solares (Fonte: Pigozzo, 2019)

O zênite solar (θ_z) é o ângulo entre a linha que liga ao sol e a vertical, variando entre 0° e 90° .

O azimute solar (γ_s) é definido como o ângulo entre o eixo da direção norte e a projeção no plano horizontal da linha que liga ao sol. Os deslocamentos para o leste são negativos, variando entre 0° e -180° , enquanto deslocamentos para o oeste são positivos, variando entre 0° e 180° .

Contudo, existem mais dois ângulos de interesse para nosso estudo, θ_t , é o ângulo de interesse para a movimentação dos espelhos que promove a correta reflexão da radiação solar direta para o absorvedor. E o θ_L que serve para determinar as perdas de final de linha e o posicionamento longitudinal do absorvedor para minimizá-las. Ambos os ângulos podem ser observados na Figura 20.

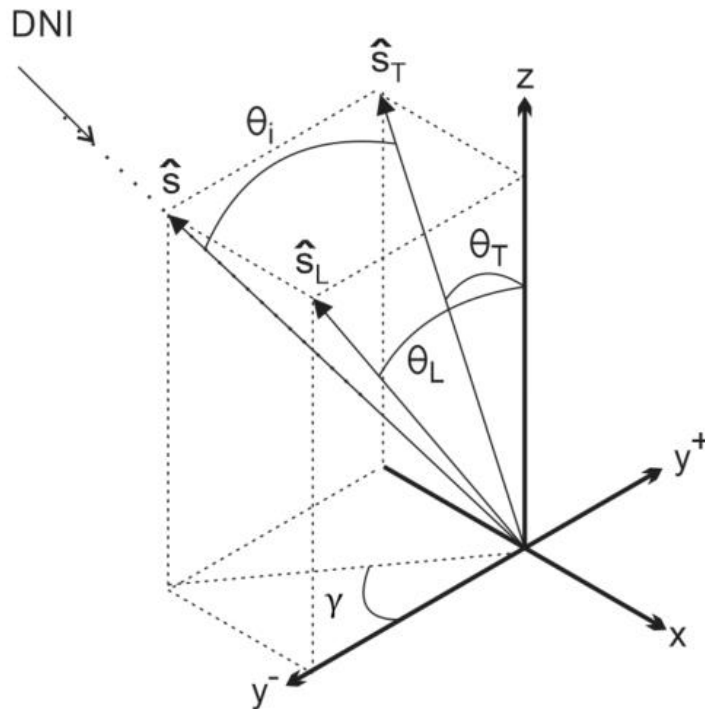


Figura 20 - Ângulos complementares ao estudo (Fonte: Pigozzo, 2019)

É importante conhecer mais algumas variáveis para entender o decorrer dos cálculos de rastreamento solar, estas serão descritas em seguida.

Para efetuar alguns dos cálculos de rastreamento solar e as relações sol-ângulo utilizamos “tempo solar”, que não coincide com hora local do relógio (DUFFIE & BECKMAN).

Também é importante conhecer a equação do tempo, que leva em conta as variações na taxa de rotação da terra que afetam o momento em que o sol atravessa o meridiano do observador (DUFFIE & BECKMAN).

A Declinação solar (δ) é o ângulo que se forma entre a linha do equador e a reta que une os centros do Sol e da Terra (GÓIS, SOUSA & LEMOS, 2020).

O ângulo hora (ω) é o ângulo formado pelo plano do meridiano do observador com o plano do meridiano do sol. (GÓIS, SOUSA & LEMOS, 2020).

2.3.4 ANO TÍPICO METEOROLÓGICO (TMY)

Ao decorrer do ano as variáveis meteorológicas tendem a não se comportam de forma linear. Elas variam conforme as estações do ano, fenômenos climáticos ou quaisquer interferências de caráter meteorológico. Para um estudo consistente do comportamento de tecnologias que dependem do clima e suas características, é necessário de conhecer esses tipos de variações climáticas e traçar uma linha na qual os estudos podem se basear. Tendo isto em vista, a construção de um TMY é baseada em anos de aferições no local de estudo. Assim é possível antecipar de maneira satisfatória o comportamento das variáveis durante um ano (MOTTA, 2017).

O TMY que será utilizado no trabalho em questão é composto por 12 meses, retirados de diferentes anos que retratam o cenário mais próximo de um ano em nossa região. Dados retirados entre os anos de 2006 e 2015.

Na Figura 21, mais especificamente a região destacada em vermelho podemos observar de quais anos os meses que compõem o TMY foram retirados. A região destacada em verde diz respeito aos dados de latitude, longitude e elevação do local em análise. A região destacada em azul é a legenda dos dados que iniciam na linha 17 do Excel.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L |
|----|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Latitude (decimal degrees): -28.650 | | | | | T2m: 2-m air temperature (degree Celsius) | | | | | | |
| 2 | Longitude (decimal degrees): -53.103 | | | | | RH: relative humidity (%) | | | | | | |
| 3 | Elevation (m): 431.0 | | | | | G(h): Global irradiance on the horizontal plane (W/m2) | | | | | | |
| 4 | month, year | | | | | Gb(n): Beam/direct irradiance on a plane always normal to sun rays (W/m2) | | | | | | |
| 5 | 1,2008 | | | | | Gd(h): Diffuse irradiance on the horizontal plane (W/m2) | | | | | | |
| 6 | 2,2008 | | | | | IR(h): Surface infrared (thermal) irradiance on a horizontal plane (W/m2) | | | | | | |
| 7 | 3,2012 | | | | | WS10m: 10-m total wind speed (m/s) | | | | | | |
| 8 | 4,2015 | | | | | WD10m: 10-m wind direction (0 = N, 90 = E) (degree) | | | | | | |
| 9 | 5,2011 | | | | | SP: Surface (air) pressure (Pa) | | | | | | |
| 10 | 6,2013 | | | | | PVGIS (c) European Union, 2001-2022 | | | | | | |
| 11 | 7,2012 | | | | | | | | | | | |
| 12 | 8,2012 | | | | | | | | | | | |
| 13 | 9,2013 | | | | | | | | | | | |
| 14 | 10,201 | | | | | | | | | | | |
| 15 | 11,2015 | | | | | | | | | | | |
| 16 | 12,2013 | | | | | | | | | | | |
| 17 | time(UTC),T2m,RH,G(h),Gb(n),Gd(h),IR(h),WS10m,WD10m,SP | | | | | | | | | | | |
| 18 | 20080101:0000,22.51,96.58,0.0,-0.0,0.0,379.54,1.83,116.0,96160.0 | | | | | | | | | | | |
| 19 | 20080101:0100,22.07,96.56,0.0,-0.0,0.0,372.74,1.77,104.0,96176.0 | | | | | | | | | | | |
| 20 | 20080101:0200,21.63,96.55,0.0,-0.0,0.0,365.93,1.71,92.0,96192.0 | | | | | | | | | | | |
| 21 | 20080101:0300,21.19,96.53,0.0,-0.0,0.0,359.13,1.66,85.0,96147.0 | | | | | | | | | | | |
| 22 | 20080101:0400,20.75,96.51,0.0,-0.0,0.0,352.33,1.6,77.0,96103.0 | | | | | | | | | | | |

Figura 21 - Ano típico meteorológico (Fonte: Autor, 2022)

2.4 VAPOR PARA PROCESSOS INDUSTRIAIS

Existem indústrias que necessitam pesadamente de calor de processo, como exemplo podemos citar o setor químico, indústrias que produzem celulose e papel, refinarias de petróleo, as indústrias têxteis, entre outras. O calor de processo é entregue geralmente a partir do vapor de água, com pressão entre 5 e 7 atm e temperatura entre 150 °C e 200 °C. Na maior parte das vezes, a energia é transferida para o vapor pela queima de carvão, óleo, gás natural ou outro combustível em uma fornalha. (ÇENGEL, 2013).

O trabalho em questão traz uma alternativa para entrega de vapor, com a ideia de suplementar a produção de vapor de uma caldeira, economizando combustível fóssil e utilizando uma fonte renovável de energia.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão desenvolvidas a planilha de rastreamento solar, rendimento da bancada e o nosso objetivo final, a entrega direta de vapor para processos industriais.

3.1 PLANILHA DE RASTREAMENTO SOLAR

O trabalho foi iniciado com a coleta dos dados do ano típico meteorológico (TMY) para a cidade de Ibirubá – Rio Grande do Sul, encontramos o arquivo referente ao período de 2006 a 2015 no site “EU SCIENCE HUB - The European Commission's science and knowledge service”, onde coletamos os dados em formato compatível com o Microsoft office Excel.

O TMY coletado conta com aferições referentes as seguintes propriedades: Temperatura ambiente, Umidade Relativa, Irradiação Global, Irradiação Direta, Irradiação Difusa, Velocidade do vento, Direção do vento e Pressão Atmosférica.

Em seguida, foi iniciado o tratamento dos dados no Excel, para uma melhor compreensão e para que pudessem ser utilizados na planilha de rastreamento solar. A disposição dos dados pós-tratamento pode ser observada na Figura 22 .

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S |
|----|-------------------------------------|----------|----------------|------|-----|-----|------------|---|-------|------|-------|-------|------|---------|-------|--------|------------|----------------|-------|
| 1 | Latitude (decimal degrees): | -28,65 | graus | | | | | T2m: 2-m air temperature (degree Celsius) | | | | | | | | | | | |
| 2 | Longitude (decimal degrees): | -53,10 | graus | | | | | RH: relative humidity (%) | | | | | | | | | | | |
| 3 | Longitude Padrão (decimal degrees): | -60,00 | graus | | | | | G(h): Global irradiance on the horizontal plane (W/m2) | | | | | | | | | | | |
| 4 | Elevation (m): 417.0 | | graus | | | | | Gb(n): Beam/direct irradiance on a plane always normal to sun rays (W/m2) | | | | | | | | | | | |
| 5 | β | | graus | | | | | Gd(h): Diffuse irradiance on the horizontal plane (W/m2) | | | | | | | | | | | |
| 6 | γ | | graus | | | | | IR(h): Surface infrared (thermal) irradiance on a horizontal plane (W/m2) | | | | | | | | | | | |
| 7 | γ_s | | graus | | | | | WS10m: 10-m total wind speed (m/s) | | | | | | | | | | | |
| 8 | γ_{col} | 10 | graus | | | | | WD10m: 10-m wind direction (0 = N, 90 = E) (degree) | | | | | | | | | | | |
| 9 | Neta o (rendimento óptico de pico) | 0,47 | Adimensional | | | | | SP: Surface (air) pressure (Pa) | | | | | | | | | | | |
| 10 | Am(área de espelhos) | 50 | m ² | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | Vazão mássica de fluido | 100 | g/s | | | | | PVGIS (c) European Union, 2001-2022 | | | | | | | | | | | |
| 25 | Time(UTC) | Data | Mês | Ano | Mês | Dia | Data real | Data início ano | Dia N | Hora | Tamb | RH | G(h) | Gb(n) | Gd(h) | IR(h) | wind speed | wind direction | SP |
| 26 | 20080101:0000 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 0 | 22,59 | 96,58 | 0 | 0 | 0 | 379,54 | 1,83 | 116 | 96321 |
| 27 | 20080101:0100 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 1 | 22,15 | 96,56 | 0 | 0 | 0 | 372,74 | 1,77 | 104 | 96337 |
| 28 | 20080101:0200 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 2 | 21,71 | 96,55 | 0 | 0 | 0 | 365,93 | 1,71 | 92 | 96353 |
| 29 | 20080101:0300 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 3 | 21,27 | 96,53 | 0 | 0 | 0 | 359,13 | 1,66 | 85 | 96309 |
| 30 | 20080101:0400 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 4 | 20,83 | 96,51 | 0 | 0 | 0 | 352,33 | 1,6 | 77 | 96264 |
| 31 | 20080101:0500 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 5 | 20,39 | 96,5 | 0 | 0 | 0 | 345,53 | 1,54 | 70 | 96220 |
| 32 | 20080101:0600 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 6 | 19,94 | 96,48 | 0 | 0 | 0 | 338,73 | 1,49 | 68 | 96236 |
| 33 | 20080101:0700 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 7 | 19,5 | 96,47 | 0 | 0 | 0 | 331,93 | 1,43 | 67 | 96251 |
| 34 | 20080101:0800 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 8 | 18,56 | 100 | 0 | 0 | 0 | 341 | 1,43 | 65 | 96267 |
| 35 | 20080101:0900 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 9 | 21,07 | 93,4 | 43 | 277,23 | 23 | 347,6 | 1,46 | 61 | 96312 |
| 36 | 20080101:1000 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 10 | 23,58 | 86,79 | 262 | 738,54 | 53 | 354,2 | 1,49 | 56 | 96356 |
| 37 | 20080101:1100 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 11 | 26,09 | 80,19 | 500 | 894,68 | 64 | 360,8 | 1,52 | 52 | 96400 |
| 38 | 20080101:1200 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 12 | 27,46 | 71,96 | 724 | 959,45 | 76 | 363,5 | 1,79 | 62 | 96366 |
| 39 | 20080101:1300 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 13 | 28,83 | 63,72 | 901 | 981,58 | 94 | 366,2 | 2,06 | 71 | 96331 |
| 40 | 20080101:1400 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 14 | 30,2 | 55,49 | 1042 | 1033,54 | 81 | 368,9 | 2,33 | 81 | 96296 |
| 41 | 20080101:1500 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 15 | 30,8 | 53,63 | 1061 | 884,6 | 188 | 372,85 | 2,46 | 88 | 96236 |
| 42 | 20080101:1600 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 16 | 31,39 | 51,78 | 1064 | 885,31 | 188 | 376,8 | 2,59 | 94 | 96175 |
| 43 | 20080101:1700 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 17 | 31,98 | 49,92 | 1045 | 1015,56 | 93 | 380,75 | 2,72 | 101 | 96115 |
| 44 | 20080101:1800 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 18 | 31,4 | 52,41 | 895 | 912,21 | 134 | 385,05 | 2,94 | 99 | 96093 |
| 45 | 20080101:1900 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 19 | 30,82 | 54,89 | 632 | 557,51 | 249 | 389,35 | 3,17 | 98 | 96071 |
| 46 | 20080101:2000 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 20 | 30,24 | 57,38 | 490 | 733,67 | 119 | 393,65 | 3,39 | 96 | 96048 |
| 47 | 20080101:2100 | 20080101 | 0101 | 2008 | 01 | 01 | 01/01/2008 | 01/01/2008 | 1 | 21 | 28,61 | 63,39 | 112 | 9,91 | 109 | 388,72 | 3,02 | 82 | 96121 |

Figura 22 - TMY após o tratamento de dados (Fonte: Autor, 2022)

Os títulos de colunas destacados em verde na Figura 22, são dados que derivam dos dados nativos do TMY, estes foram adicionados na planilha com o intuito de possibilitar a aplicação das equações para rastreamento solar.

Após o tratamento e manipulação dos dados para obter compatibilidade com as necessidades das equações de rastreamento solar, iniciamos a aplicação das equações para rastreamento solar propostas por Duffie e Beckman no livro “*Solar Engineering of Thermal Processes*”.

A Equação (01), representa uma correção ao dia do ano vigente, onde n é o dia do ano na escala de 1 a 365.

$$B = (n - 1) * \frac{360}{365} \quad (01)$$

A equação do tempo, pode ser observada na Equação (02). A variável B , é obtida através da Equação (01)

$$E = 229.2 * (0.000075 + 0.001868 * \cos(B) - 0.032077 * \sin(B) - 0.014615 * \cos(2B) - 0.04089 * \sin(2B)) \quad (02)$$

A Equação (03) representa o tempo solar, que leva em consideração o meridiano padrão para o fuso horário local (L_{st}), a longitude do local em análise (L_{loc}), a hora relógio do local em análise e a variável E que é definida pela Equação (02).

$$Solar\ time - standard\ time = 4 * (L_{st} - L_{loc}) + E \quad (03)$$

A declinação (δ) pode ser obtida a partir da Equação (04), onde n é o dia do ano na escala de 1 a 365.

$$\delta = 23.45 * \text{sen}\left(360 * \frac{284 + n}{365}\right) \quad (04)$$

A Equação (05) resulta no ângulo hora (ω), que é o representa o deslocamento angular do sol a leste ou oeste do meridiano local devido à rotação da terra no seu eixo em 15° por hora.

$$\omega = (E * 15^\circ) - 180^\circ \quad (05)$$

O Zênite solar (θz) pode ser encontrado através da Equação (06 com base na latitude φ , na declinação δ (Equação (04)), no ângulo hora ω (Equação (05)).

$$\cos(\theta z) = \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(\omega) + \text{sen}(\varphi) * \text{sen}(\delta) \quad (06)$$

A Equação (07) resulta no azimute solar (γ_s), com base na latitude φ , na declinação δ (Equação (04)), no ângulo hora ω (Equação (05)).

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) * \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos(\theta z) * \text{sen}(\varphi) - \text{sen}(\delta)}{\text{sen}(\theta z) * \cos(\varphi)} \right) \right| \quad (07)$$

A Equação (08), entrega o ângulo de incidência solar transversal (θ_T), a partir do zênite solar (θ_z) (Equação (06)), do Azimute solar (γ_s) (Equação (07)) e do Ângulo azimute do concentrador solar (γ_{col}), que é um dado construtivo da bancada.

$$\theta_T = \arctan(\sin(\gamma_s - \gamma_{col}) * \tan(\theta_z)) \quad (08)$$

A Equação (09), entrega o ângulo de incidência solar longitudinal (θ_L) a partir do zênite solar (θ_z) (Equação (06)), do Azimute solar (γ_s) (Equação (07)) e do Ângulo azimute do concentrador solar (γ_{col}), que é um dado construtivo da bancada.

$$\theta_L = \arctan(\cos(\gamma_s - \gamma_{col}) * \tan(\theta_z)) \quad (09)$$

3.2 ANÁLISE ÓTICA E TÉRMICA DO CONCENTRADOR

Como a tecnologia de concentradores solares do tipo Fresnel Linear é pouco difundida e a pouca informação detalhada divulgada, iremos utilizar as informações construtivas do concentrador solar Fresnel Linear desenvolvido pelo laboratório LEPTEN da Universidade Federal de Santa Catarina, Figura 23, pois temos acesso a estes dados. Estas informações são utilizadas no decorrer da análise ótica e térmica do concentrador. A partir deste ponto iniciaremos a análise ótica e térmica do concentrador solar.

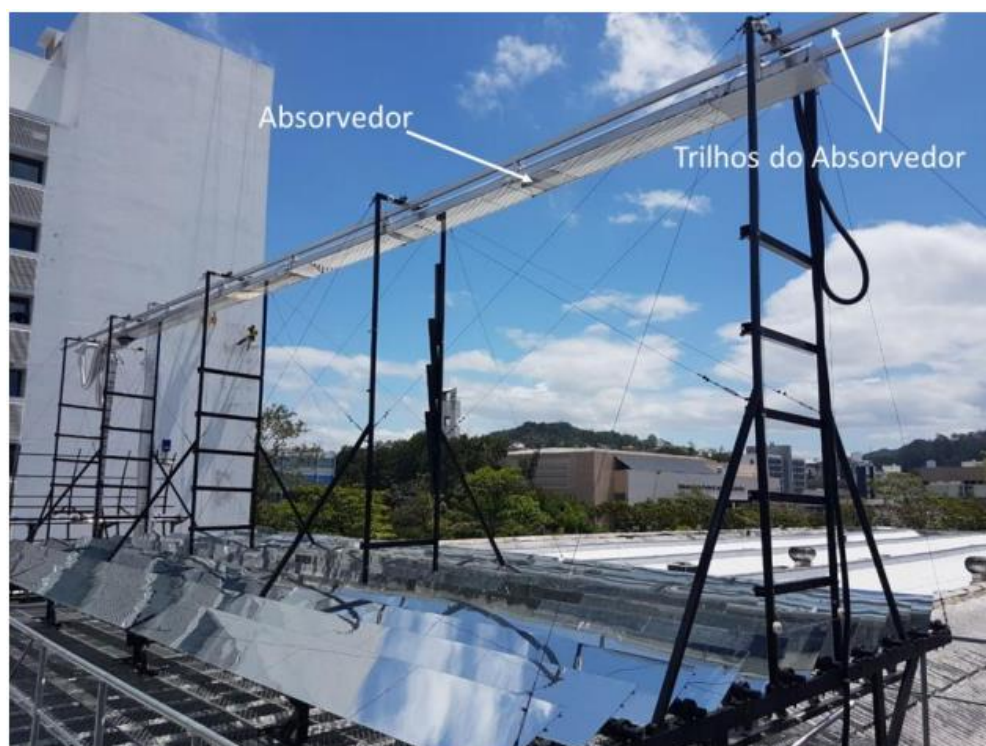


Figura 23 - Concentrador solar Fresnel linear (Fonte: PIGOZZO, SÁ, SOUSA, PASSOS, 2018)

Para darmos sequência são necessárias mais duas considerações, o modificador pelo ângulo de incidência longitudinal (IAM_L) e o modificador pelo ângulo de incidência transversal (IAM_T). O IAM_L e IAM_T expressam as perdas de rendimento que inclinação dos raios solares incidentes nos espelhos do concentrador solar acarretam. O IAM utiliza como referência a eficiência ótica zero, que é a eficiência ótica no ângulo de incidência zero. Em vez de efetuar várias medições, geralmente apenas alguns pontos são analisados e a curva é

adequada a ela. Para o concentrador solar Fresnel linear o IAM está dividido em duas curvas obtidas experimentalmente pelo laboratório LEPTEN, cada uma representando a variação da eficiência óptica sobre uma direção diferente, a longitudinal (IAM_L) e a transversal (IAM_T), Figura 24. Nestas considerações também entram as perdas por sombreamento dos componentes e perdas finais de espelho. (SÁ, 2018).

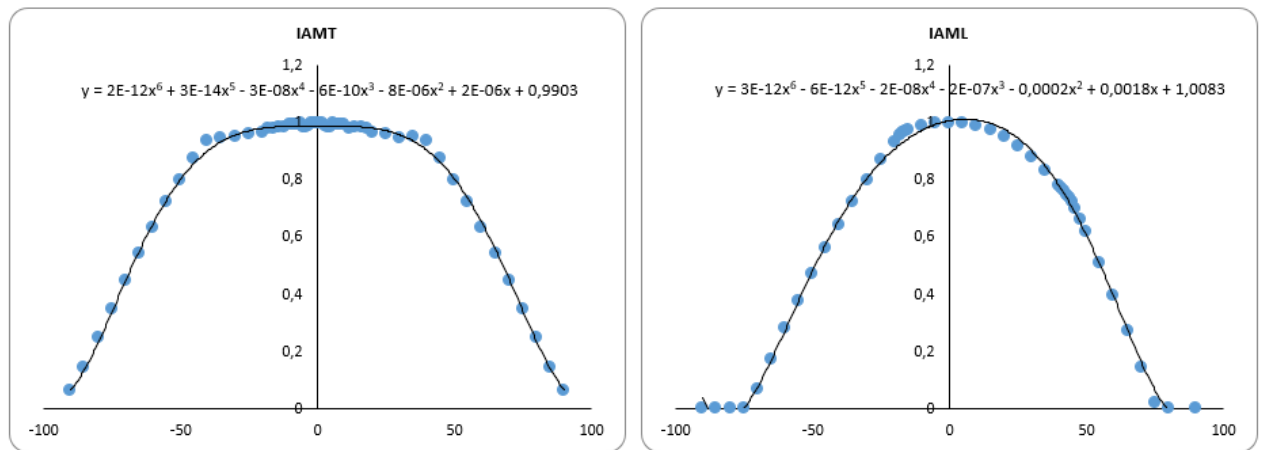


Figura 24 - Curvas IAMT e IAML (Fonte: Autor, 2022)

Neste momento já temos as equações necessárias para o rastreamento solar, partimos então para as perdas térmicas e posteriormente para absorção de energia do concentrador.

As equações que seguem foram extraídas dos trabalhos realizados no laboratório LEPTEN.

A Equação (10) entrega as perdas térmicas, levando em consideração o comprimento da tubulação do absorvedor (L_T), a temperatura do fluido (T_{HTF}), a temperatura ambiente (T_{amb}) e as constantes a e b , que são resultado do experimento realizado pelo laboratório LEPTEN.

$$\frac{\dot{Q}_{HL}}{L_T} = a * (T_{HTF} - T_{amb})^2 + b * (T_{HTF} - T_{amb}) \quad (10)$$

A Equação (11) entrega a potência que chega à bancada, considerando para isto a área de espelhos do concentrador (A_m), a irradiação solar direta (DNI), o rendimento óptico de pico (η_0), o modificador pelo ângulo de incidência (IAM) e as perdas térmicas (Q_{HL}).

$$\dot{Q}_{Solar} = A_m * DNI * \eta_0 * IAM_L * IAM_T \quad (11)$$

A partir deste ponto já temos a potência que chega à bancada e, que em tese poderia ser absorvida, entretanto, ainda existem alguns pontos a serem mencionados.

Uma parcela da energia que chega à bancada é despreendida para o aquecimento dos tubos absorvedores, este valor pode ser obtido através da Equação (12). A Equação (12) é composta pelo CP_{tubos} , que para cada 12 metros de tubos absorvedores vale aproximadamente 110000 J/°C. Também faz parte da equação o Nr_{Md} que representa o número de módulos de concentrador, sendo que um módulo possui 12 metros de tubos absorvedores. Note que a última parte da equação é a subtração de temperaturas do fluido, mas em tempos diferentes, entendemos que o aquecimento dos tubos ocorre de maneira transiente, contudo, possuímos a limitação dos dados do ano típico meteorológico que nos entrega aferições de hora em hora, logo teremos um resultado aproximado do valor de C_{tubos} realizando cálculos iterativos no excel com os dados com defasagem de uma hora entre si.

$$C_{tubos} = CP_{tubos} * Nr_{Md} * (T_{htf_{i+1}} - T_{htf_i}) \quad (12)$$

Neste ponto do trabalho já pode-se calcular de forma aproximada a potência que o nosso fluido absorveria em uma aplicação hipotética. A Equação (13) entrega a potência absorvida pelo fluido, relacionando a potência que chega à bancada (\dot{Q}_{Solar}), as perdas térmicas (Q_{HL}) e o C_{tubos} , ambas as variáveis podem ser calculadas como demonstrado nas equações acima.

$$\dot{Q}_{abs_{Fluido}} = \dot{Q}_{solar} - \dot{Q}_{HL} - Ctubos \quad (13)$$

Em seguida partimos para o cálculo no qual conseguimos estipular a temperatura do fluído conforme a energia que é entregue ao mesmo, utilizamos uma manipulação da Equação (14) para isto. A Equação (14), e composta pela vazão mássica de fluído (\dot{m}), pelo calor específico do fluído (Cp), e pela subtração de temperaturas do fluído, em diferentes períodos, sendo necessário mais uma vez a realização de cálculos iterativos.

$$\dot{Q} = \dot{m} * Cp * (T_{htf_{i+1}} - T_{htf_i}) \quad (14)$$

A temperatura de saturação da água no concentrador em análise é cerca de 200°C, portanto, toda energia entregue para o fluído ao chegar nesta temperatura é utilizada de duas formas. Primeiramente, parte da energia é utilizada na mudança de fase do fluído, conforme a entalpia de vaporização (h_{lv}) para a temperatura em questão. Entendesse que não haverá uma interrupção brusca na entrega de energia ao fluído, logo, após a entrega de energia descrita pela entalpia de vaporização, todo o excedente energético entregue ao fluído será considerado para conversão direta de vapor.

As aplicações das equações demonstradas até o momento podem ser observadas na Figura 25 e Figura 26, estas foram divididas para uma melhor compreensão.

| COS θz | θz | θt | θL | γs | IAML | IAMT | Qabs | QHL | Temp. do fluido |
|--------------|-------------|--------------|--------------|---------|-------------|--------------|-------------|-------------|-----------------|
| -0,613152086 | 127,8177699 | 22,64315348 | 42,33732706 | -8,89 | 0,856208145 | 0,977581103 | 0 | 0 | 25 |
| -0,613605136 | 127,8506368 | 22,32364912 | 42,42528655 | -8,61 | 0,855656206 | 0,978171764 | 0 | 71,51179446 | 24,83995868 |
| -0,559468643 | 124,0190588 | 40,36252105 | 31,69571927 | -25,01 | 0,923445077 | 0,890248871 | 0 | 78,61987557 | 24,66400969 |
| -0,454431919 | 117,0283889 | 55,88160844 | -5,723640857 | -38,85 | 0,993328701 | 0,645501737 | 0 | 85,33771524 | 24,47302637 |
| -0,305653044 | 107,7974569 | 69,65493898 | -44,79778434 | -49,97 | 0,721059481 | 0,179375884 | 0 | 91,68519659 | 24,26783756 |
| -0,123271052 | 97,08092217 | 82,41518727 | -44,06654214 | -58,89 | 0,726280889 | -0,577320821 | 0 | 97,68136621 | 24,04922951 |
| 0,080285026 | 85,3950508 | -85,25960958 | -34,51288476 | -66,24 | 0,801947164 | -0,800770951 | 0 | 103,6004622 | 23,81737469 |
| 0,291143179 | 73,07359114 | -72,93895979 | 1,355901944 | -72,58 | 1,01043701 | 0,019514419 | 0 | 108,9335794 | 23,57358451 |
| 0,494933773 | 60,33461668 | -60,32474558 | -42,22361956 | -78,38 | 0,739928578 | 0,526840552 | 0 | 126,8316616 | 23,28973894 |
| 0,677768815 | 47,33046457 | -47,25607164 | -11,8583984 | -84,13 | 0,966696357 | 0,808816421 | 6297,934931 | 430,1397236 | 36,4216939 |
| 0,8271884 | 34,18900732 | -33,72672199 | 20,22502258 | -90,66 | 0,982720686 | 0,938680377 | 17055,79558 | 1508,898032 | 71,21519829 |
| 0,933009829 | 21,09103861 | -19,88734123 | 36,38327138 | -100,29 | 0,89419535 | 0,981923008 | 18800,43936 | 2862,694423 | 106,8834078 |
| 0,988021548 | 8,877127462 | -6,000762931 | 42,93432028 | -127,70 | 0,852473466 | 0,989906807 | 19220,78317 | 4395,481587 | 140,0620014 |
| 0,988474598 | 8,707303434 | 7,652507119 | 43,53426364 | 128,68 | 0,84874985 | 0,989687498 | 19578,22313 | 5994,448568 | 170,4620937 |
| 0,934338105 | 20,87952706 | 20,8777579 | 39,48430538 | 100,51 | 0,874334832 | 0,980582215 | 21236,01053 | 7770,102699 | 200 |
| 0,829301381 | 33,97296031 | 33,62883523 | 30,18399142 | 90,78 | 0,932457957 | 0,939330626 | 19384,02925 | 9319,223796 | 200 |
| 0,680522506 | 47,115513 | 46,01835759 | 9,92155615 | 84,23 | 1,010644749 | 0,826302728 | 21026,24671 | 9521,439762 | 200 |
| 0,498140514 | 60,12294655 | 58,30146508 | -25,99621881 | 78,47 | 0,871822567 | 0,584181927 | 20806,62095 | 9453,933315 | 200 |
| 0,294584436 | 72,86737998 | 70,86490103 | -42,55932491 | 72,68 | 0,737394605 | 0,122948049 | 15807,48023 | 8773,518037 | 200 |
| 0,083726283 | 85,19721484 | 84,23652671 | 33,09824241 | 66,35 | 0,914867557 | -0,718027672 | 11986,12358 | 8273,905386 | 200 |
| -0,120064311 | 96,89581415 | -80,89827141 | 35,12149757 | 59,02 | 0,902209919 | -0,466691331 | 15555,22226 | 8806,022739 | 200 |

Figura 25 - Aplicação das equações Parte 1 (Fonte: Autor, 2022)

| Ctubos | QabsFluido | Temp. do fluido | Temp. até vap. | Temp. exced. | Exced. de energia [W] | M disp. [kg/s] |
|--------------|--------------|-----------------|----------------|--------------|-----------------------|----------------|
| -4,934607227 | -66,57718723 | 24,83995868 | 24,83995868 | 0 | 0 | 0 |
| -5,425093987 | -73,19478158 | 24,66400969 | 24,66400969 | 0 | 0 | 0 |
| -5,888652488 | -79,44906275 | 24,47302637 | 24,47302637 | 0 | 0 | 0 |
| -6,326654744 | -85,35854184 | 24,26783756 | 24,26783756 | 0 | 0 | 0 |
| -6,74041505 | -90,94095116 | 24,04922951 | 24,04922951 | 0 | 0 | 0 |
| -7,148856961 | -96,45160526 | 23,81737469 | 23,81737469 | 0 | 0 | 0 |
| -7,516863929 | -101,4167155 | 23,57358451 | 23,57358451 | 0 | 0 | 0 |
| -8,751905037 | -118,0797566 | 23,28973894 | 23,28973894 | 0 | 0 | 0 |
| 404,9019446 | 5462,893263 | 36,4216939 | 36,4216939 | 0 | 0 | 0 |
| 1072,799719 | 14474,09783 | 71,21519829 | 71,21519829 | 0 | 0 | 0 |
| 1099,769792 | 14837,97514 | 106,8834078 | 106,8834078 | 0 | 0 | 0 |
| 1023,006637 | 13802,29495 | 140,0620014 | 140,0620014 | 0 | 0 | 0 |
| 937,3361781 | 12646,43838 | 170,4620937 | 170,4620937 | 0 | 0 | 0 |
| 910,7521123 | 12555,15572 | 200,6427564 | 200 | 0,642756449 | 267,3866829 | 0,001378424 |
| 0 | 10064,80546 | 224,1942439 | 200 | 24,19424389 | 10064,80546 | 0,05188579 |
| 0 | 11504,80694 | 227,6557859 | 200 | 27,65578592 | 11504,80694 | 0,059309243 |
| 0 | 11352,68764 | 227,2901145 | 200 | 27,29011452 | 11352,68764 | 0,058525042 |
| 0 | 7033,962189 | 216,908563 | 200 | 16,90856295 | 7033,962189 | 0,036261275 |
| 0 | 3712,218191 | 208,9236014 | 200 | 8,923601421 | 3712,218191 | 0,019137118 |
| 0 | 6749,19952 | 216,2240373 | 200 | 16,22403731 | 6749,19952 | 0,034793275 |

Figura 26 - Aplicação das equações Parte 2 (Fonte: Autor, 2022)

Quando é realizada a razão entre o excedente de energia e a entalpia de vaporização do fluido para a temperatura saturação, o resultado será vazão mássica de vapor disponível para utilização. A entalpia de vaporização para a temperatura de saturação de 200 °C é de 1939,8 KJ/Kg (ÇENGEL, 2013).

Toda a planilha de rastreamento solar foi pensada de forma que possamos alterar os parâmetros, como os aspectos construtivos da bancada, a região de estudo, parâmetros processuais, comprimento de tubos absorvedores e o número de concentradores solares. Desta maneira, podemos replicar o estudo para outras regiões e para outras finalidades de processo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão expostos os dados que obtivemos.

4.1 IRRADIAÇÃO DIRETA

No Gráfico 1 podemos observar a irradiação direta na região de Ibirubá – Rio Grande do Sul em um dia qualquer do ano, a existência dos picos e vales do gráfico se dá pelas questões relativas a sombreamento por nuvens. Note que o eixo das abscissas está dividido em horas relógio, já o eixo das ordenadas estão as faixas de irradiação.

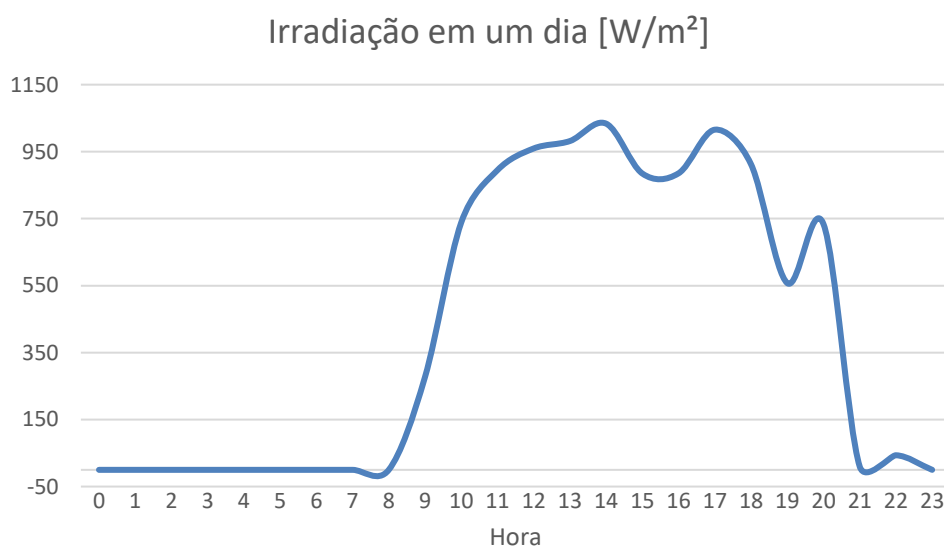


Gráfico 1 - Irradiação em um dia qualquer (Fonte: Autor, 2022)

O Gráfico 2 apresenta os valores de irradiação direta mensal para a região de Ibirubá – Rio Grande do Sul, nele nós podemos constatar as baixas de irradiação devido aos meses mais chuvosos e também a variação ocasionada pelas diferentes estações do ano.

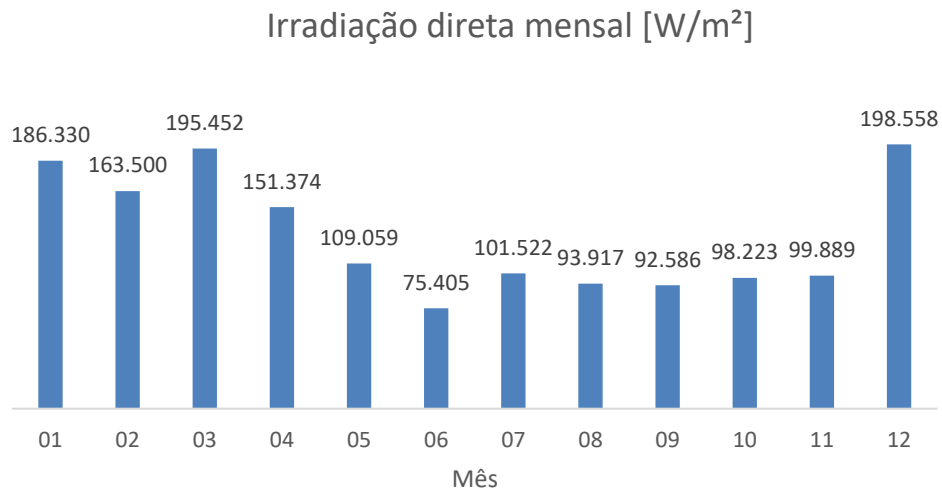


Gráfico 2 - Irradiação direta mensal (Fonte: Autor, 2022)

4.2 ENERGIA SOLAR QUE CHEGA AO CONCENTRADOR

Após o todos os cálculos de rastreamento solar, chegamos à conclusão de que um módulo do concentrador solar desenvolvido pelo laboratório LEPTEN da Universidade Federal de Santa Catarina recebe no seu absorvedor as taxas irradiativas descritas mensalmente no Gráfico 3. Novamente pode-se observar o efeito das diferentes estações do ano na irradiação que chega ao concentrador, notem a queda acentuada de irradiação a partir da entrada do Outono, no mês de março.

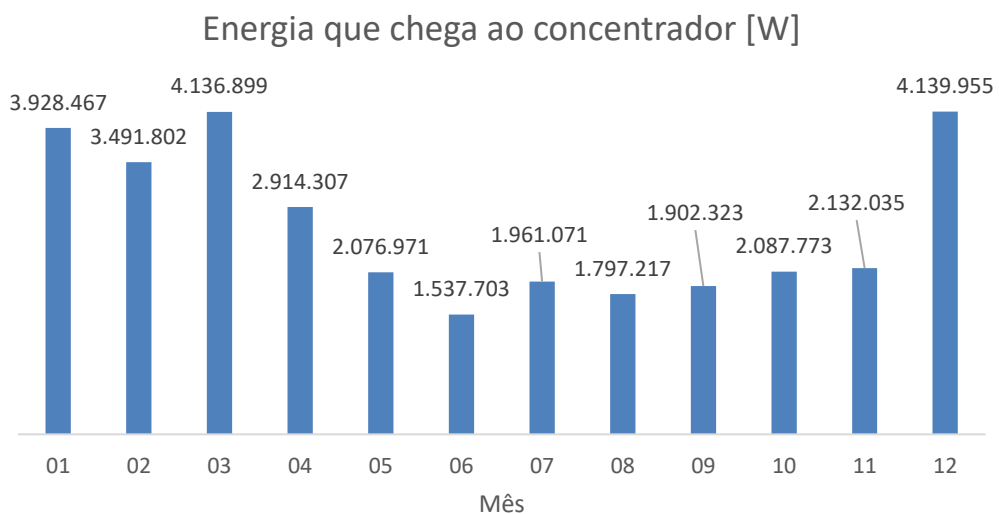


Gráfico 3 - Energia que chega ao concentrador (Fonte: Autor, 2022)

4.3 ENERGIA SOLAR ENTREGUE AO FLUÍDO EM UM DIA

No Gráfico 4 podemos observar a energia absorvida pelo fluído já descontando as perdas térmicas, perdas construtivas e a energia gasta para aquecer a tubulação do absorvedor, em um dia qualquer. Notem que o pico de energia entregue ao fluído é próximo ao meio-dia, momento em que o sol está a pino.

Note que a partir das 21 horas do dia em questão, as colunas do gráfico passam ao lado negativo do eixo das ordenadas, isso significa que neste momento o fluído passa a dissipar calor para o ambiente, em função da entrada da noite e por consequência a redução da irradiação solar que chega ao concentrador.

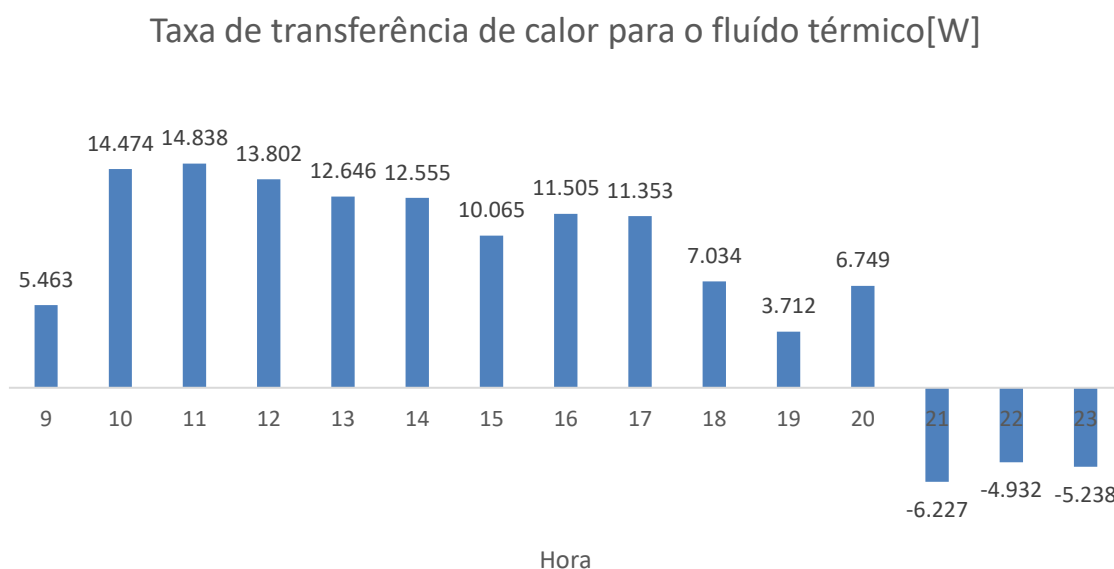


Gráfico 4 - Taxa de transferência de calor para o fluído térmico (Fonte: Autor, 2022)

Tendo em vista a perda de energia térmica do fluído para o ambiente, ao anoitecer, optou-se por não efetuar a circulação do fluído nos tubos absorvedores durante a noite. Desta forma, quando a perda de calor para o ambiente inicia, todo o fluído é direcionado para o reservatório, o qual possui isolamento térmico considerado ideal. No Gráfico 5, pode-se observar o efeito desta decisão, com a entrada da noite, todo o fluído foi direcionado ao reservatório isolado termicamente, resultando em uma perda energética irrisória. Outro efeito

interessante é a conservação da energia do fluido, que ao iniciar a circulação no dia posterior aquecerá a tubulação de modo que o sistema inicie a geração de vapor mais rapidamente.

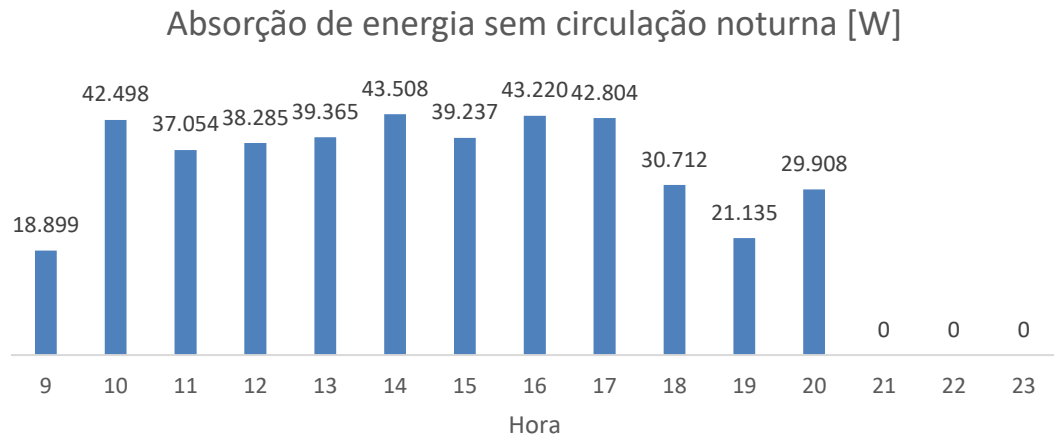


Gráfico 5 - Absorção de energia sem circulação noturna (Fonte: Autor, 2022)

4.4 ANÁLISE DE CASO REAL

O processo de pasteurização de creme, da empresa CCGL, consome 230 Kg/h de vapor a uma pressão de 3 bar (300 KPa), estes dados podem ser visualizados na Figura 27 na área destacada pelo retângulo verde.

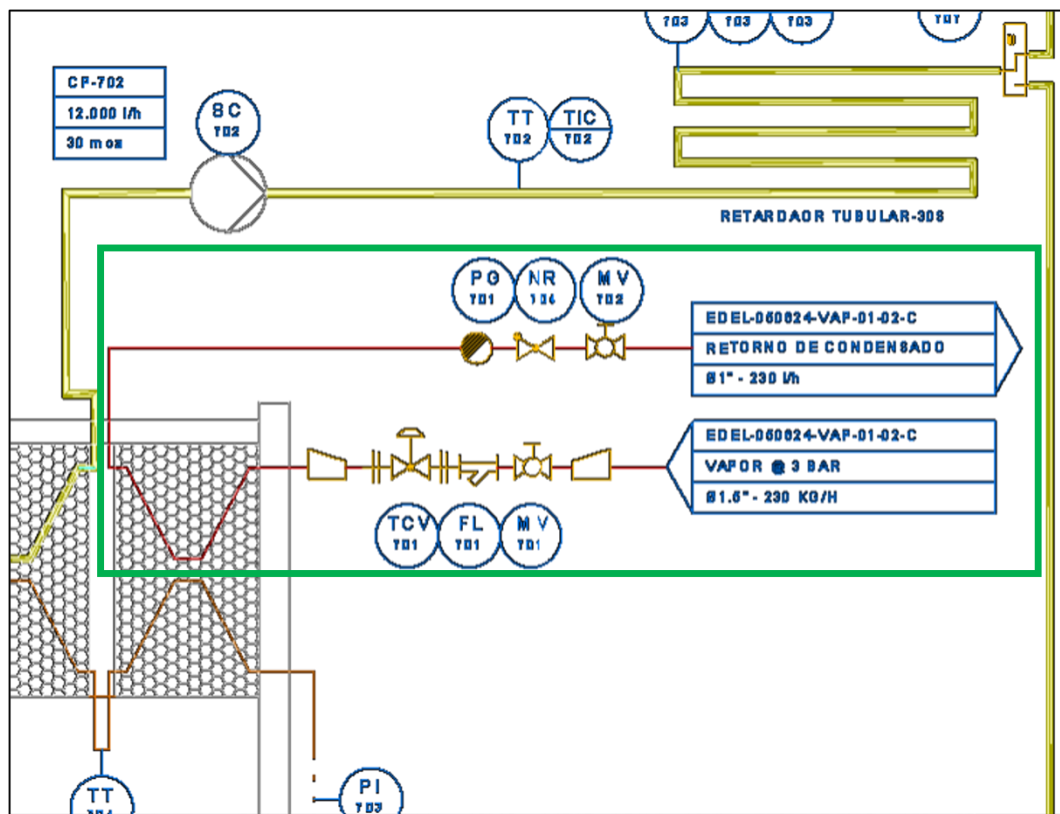


Figura 27 - Entrada de vapor (Fonte: Autor, 2022)

Na Figura 28 observar-se a tabela Água, líquido-vapor saturados de onde pode-se extrair a temperatura na qual o vapor se encontra na condição de pressão especificada pelo processo, a temperatura equivalente é 133,5 °C, observe o retângulo vermelho. Outro dado importante para a análise do caso é a entalpia de vaporização, que para a pressão de trabalho do equipamento, vale 2163,5 Kj/kg.

| Água, líquido-vapor saturados – Tabela com entrada de pressão | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------|---------------------------------------|----------------------|------------------------|-----------------|-------------------|----------------------|-----------------|-------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| Press., P kPa | Temp. sat., T_{sat} °C | Volume específico, m ³ /kg | | Energia interna, kJ/kg | | | Entalpia, kJ/kg | | | Entropia, kJ/kg·K | | |
| | | Líqu. sat., v_f | Vapor sat., v_g | Líqu. sat. u_f | Evap., u_{fg} | Vapor sat., u_g | Líqu. sat., h_f | Evap., h_{fg} | Vapor sat., h_g | Líqu. sat., s_f | Evap., s_{fg} | Vapor sat., s_g |
| 1,0 | 6,97 | 0,001000 | 129,19 | 29,302 | 2.355,2 | 2.384,5 | 29,303 | 2.484,4 | 2.513,7 | 0,1059 | 8,8690 | 8,9749 |
| 1,5 | 13,02 | 0,001001 | 87,964 | 54,686 | 2.338,1 | 2.392,8 | 54,688 | 2.470,1 | 2.524,7 | 0,1956 | 8,6314 | 8,8270 |
| 2,0 | 17,50 | 0,001001 | 66,990 | 73,431 | 2.325,5 | 2.398,9 | 73,433 | 2.459,5 | 2.532,9 | 0,2606 | 8,4621 | 8,7227 |
| 2,5 | 21,08 | 0,001002 | 54,242 | 88,422 | 2.315,4 | 2.403,8 | 88,424 | 2.451,0 | 2.539,4 | 0,3118 | 8,3302 | 8,6421 |
| 3,0 | 24,08 | 0,001003 | 45,654 | 100,98 | 2.306,9 | 2.407,9 | 100,98 | 2.443,9 | 2.544,8 | 0,3543 | 8,2222 | 8,5765 |
| 4,0 | 28,96 | 0,001004 | 34,791 | 121,39 | 2.293,1 | 2.414,5 | 121,39 | 2.432,3 | 2.553,7 | 0,4224 | 8,0510 | 8,4734 |
| 5,0 | 32,87 | 0,001005 | 28,185 | 137,75 | 2.282,1 | 2.419,8 | 137,75 | 2.423,0 | 2.560,7 | 0,4762 | 7,9176 | 8,3938 |
| 7,5 | 40,29 | 0,001008 | 19,233 | 168,74 | 2.261,1 | 2.429,8 | 168,75 | 2.405,3 | 2.574,0 | 0,5763 | 7,6738 | 8,2501 |
| 10 | 45,81 | 0,001010 | 14,670 | 191,79 | 2.245,4 | 2.437,2 | 191,81 | 2.392,1 | 2.583,9 | 0,6492 | 7,4996 | 8,1488 |
| 15 | 53,97 | 0,001014 | 10,020 | 225,93 | 2.222,1 | 2.448,0 | 225,94 | 2.372,3 | 2.598,3 | 0,7549 | 7,2522 | 8,0071 |
| 20 | 60,06 | 0,001017 | 7,6481 | 251,40 | 2.204,6 | 2.456,0 | 251,42 | 2.357,5 | 2.608,9 | 0,8320 | 7,0752 | 7,9073 |
| 25 | 64,96 | 0,001020 | 6,2034 | 271,93 | 2.190,4 | 2.462,4 | 271,96 | 2.345,5 | 2.617,5 | 0,8932 | 6,9370 | 7,8302 |
| 30 | 69,09 | 0,001022 | 5,2287 | 289,24 | 2.178,5 | 2.467,7 | 289,27 | 2.335,3 | 2.624,6 | 0,9441 | 6,8234 | 7,7675 |
| 40 | 75,86 | 0,001026 | 3,9933 | 317,58 | 2.158,8 | 2.476,3 | 317,62 | 2.318,4 | 2.636,1 | 1,0261 | 6,6430 | 7,6691 |
| 50 | 81,32 | 0,001030 | 3,2403 | 340,49 | 2.142,7 | 2.483,2 | 340,54 | 2.304,7 | 2.645,2 | 1,0912 | 6,5019 | 7,5931 |
| 75 | 91,76 | 0,001037 | 2,2172 | 384,36 | 2.111,8 | 2.496,1 | 384,44 | 2.278,0 | 2.662,4 | 1,2132 | 6,2426 | 7,4558 |
| 100 | 99,61 | 0,001043 | 1,6941 | 417,40 | 2.088,2 | 2.505,6 | 417,51 | 2.257,5 | 2.675,0 | 1,3028 | 6,0562 | 7,3589 |
| 101,325 | 99,97 | 0,001043 | 1,6734 | 418,95 | 2.087,0 | 2.506,0 | 419,06 | 2.256,5 | 2.675,6 | 1,3069 | 6,0476 | 7,3545 |
| 125 | 105,97 | 0,001048 | 1,3750 | 444,23 | 2.068,8 | 2.513,0 | 444,36 | 2.240,6 | 2.684,9 | 1,3741 | 5,9100 | 7,2841 |
| 150 | 111,35 | 0,001053 | 1,1594 | 466,97 | 2.052,3 | 2.519,2 | 467,13 | 2.226,0 | 2.693,1 | 1,4337 | 5,7894 | 7,2231 |
| 175 | 116,04 | 0,001057 | 1,0037 | 486,82 | 2.037,7 | 2.524,5 | 487,01 | 2.213,1 | 2.700,2 | 1,4850 | 5,6865 | 7,1716 |
| 200 | 120,21 | 0,001061 | 0,88578 | 504,50 | 2.024,6 | 2.529,1 | 504,71 | 2.201,6 | 2.706,3 | 1,5302 | 5,5968 | 7,1270 |
| 225 | 123,97 | 0,001064 | 0,79329 | 520,47 | 2.012,7 | 2.533,2 | 520,71 | 2.191,0 | 2.711,7 | 1,5706 | 5,5171 | 7,0877 |
| 250 | 127,41 | 0,001067 | 0,71873 | 535,08 | 2.001,8 | 2.536,8 | 535,35 | 2.181,2 | 2.716,5 | 1,6072 | 5,4453 | 7,0525 |
| 275 | 130,58 | 0,001070 | 0,65732 | 548,57 | 1.991,6 | 2.540,1 | 548,86 | 2.172,0 | 2.720,9 | 1,6408 | 5,3800 | 7,0207 |
| 300 | 133,52 | 0,001073 | 0,60582 | 561,11 | 1.982,1 | 2.543,2 | 561,43 | 2.163,5 | 2.724,9 | 1,6717 | 5,3200 | 6,9917 |
| 325 | 136,27 | 0,001076 | 0,56199 | 572,84 | 1.973,1 | 2.545,9 | 573,19 | 2.155,4 | 2.728,6 | 1,7005 | 5,2645 | 6,9650 |
| 350 | 138,86 | 0,001079 | 0,52422 | 583,89 | 1.964,6 | 2.548,5 | 584,26 | 2.147,7 | 2.732,0 | 1,7274 | 5,2128 | 6,9402 |

Figura 28 - Dados para cálculos (Fonte: Çengel, 2013)

Convertendo a necessidade de vapor do equipamento de Kg/h para Kg/s, chegamos ao valor de 0,0639 Kg/s de vapor. Neste momento, conhecendo as necessidades do equipamento, pode-se manipular a planilha de cálculos com intuito de descobrir a massa de vapor que se pode entregar por segundo, com um ou mais módulos.

A vazão mássica de fluido térmico foi estimada em 0,1 Kg/s para prosseguir com os cálculos, contudo, desta maneira conseguimos ter uma boa visualização do funcionamento do sistema. Foram selecionados dois dias quaisquer, um do verão e outro do inverno, a geração de vapor nestes dias, empregando um módulo do concentrador solar, pode ser observada nos Gráfico 6 e Gráfico 7, respectivamente.

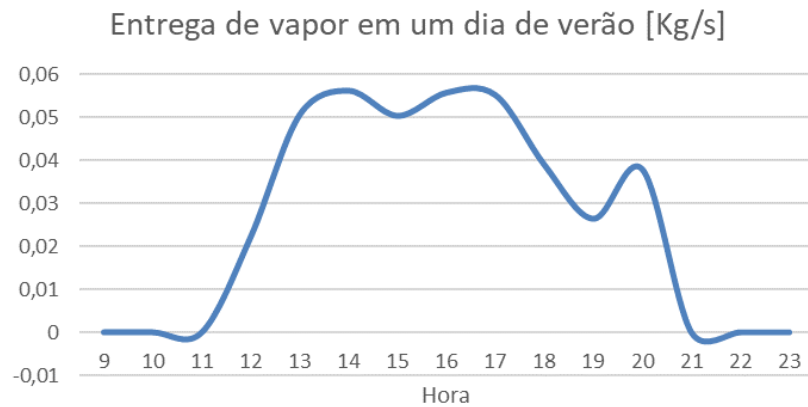


Gráfico 6 - Entrega de vapor em um dia de verão (Fonte: Autor, 2022)

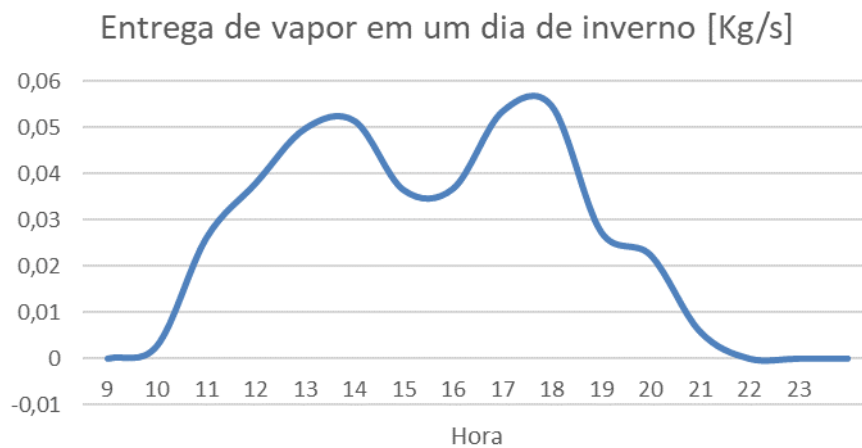


Gráfico 7 - Entrega de vapor em um dia de inverno (Fonte: Autor, 2022)

Em ambos os gráficos pode-se constatar que a entrega de vapor não alcançou a demanda do equipamento de pasteurização, contudo, existem alternativas para tratar esta situação. Há a possibilidade de instalar mais de um concentrador solar Fresnel linear e unir as gerações de vapor, desta forma seria possível entregar a demanda do equipamento. No Gráfico 8 pode-se observar a geração de vapor para quatro módulos do concentrador solar, em um dia qualquer de verão.

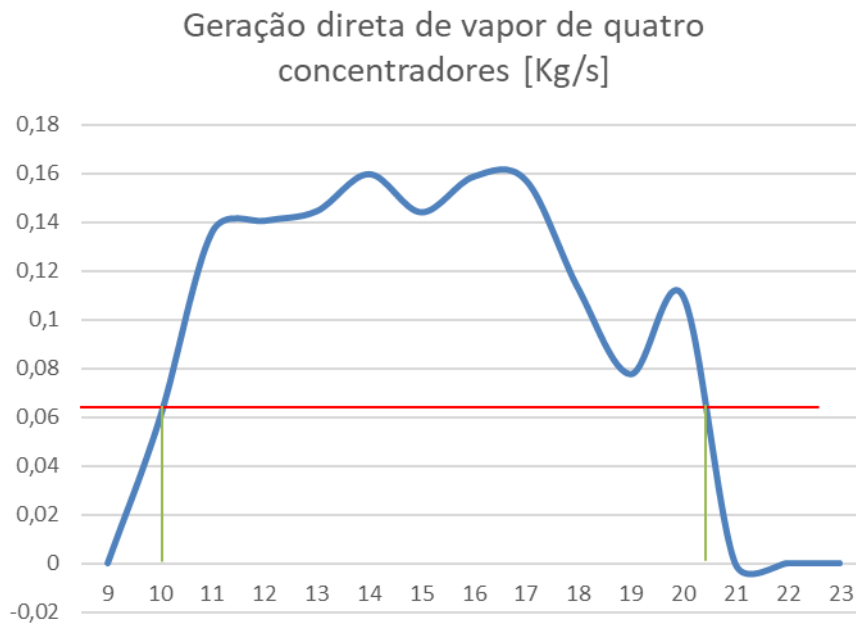


Gráfico 8 - Geração direta de vapor de quatro concentradores (Fonte: Autor, 2022)

Ao analisar o Gráfico 8, pode-se constatar que no período das 10 horas às 20:30 horas a geração de vapor do concentrador é suficiente para suprir a demanda do equipamento (demonstrada pela linha vermelha horizontal). Porém, nas demais horas do dia a entrega de vapor é insuficiente. Note que no período em que os módulos suprem a demanda do processo, há uma geração muito superior à demanda, este vapor excedente pode ser utilizado para outros processos industriais, ou também, ser armazenado em uma forma mais energética para posterior utilização.

Como já mencionado, a utilização de concentradores solares com intuito de geração direta de vapor para processos industriais tem caráter de suplementação, ou seja, os concentradores geram vapor junto a um sistema primário de geração, como uma caldeira, por exemplo, isto devido a sazonalidade da energia solar.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O aproveitamento da energia heliotérmica está em crescimento em âmbito nacional, e para fomentar ainda mais este crescimento, estudos como este são de suma importância, no que tange o fortalecimento e o incentivo à tecnologia.

A maneira com que a planilha de rastreamento solar e as análises óticas e térmicas do concentrador foram desenvolvidas, propiciam uma versatilidade quando se fala em alteração de parâmetros para adequação as necessidades do equipamento ao qual o vapor será fornecido. Desta forma novos estudos podem ser replicados para diferentes regiões e para diferentes necessidades.

A análise de caso real teve resultados satisfatórios, de modo que a instalação de 4 concentradores solares do tipo Fresnel linear desenvolvidos pelo laboratório LEPTEN, poderia suplementar a produção de vapor para o equipamento em questão, por cerca de 10 horas diárias. Contudo, mesmo com todo o potencial energético disponível pela energia solar, se faz necessária a instalação dos concentradores junto a uma fonte primária de geração de vapor, de modo que as baixas na geração de vapor já mencionadas, não impactem a continuidade do processo em que estão aplicados.

A cidade de Ibirubá que foi escolhida para ser o local de estudo, está localizada na região Sul do Brasil, a qual é caracterizada por não receber altas taxas de radiação solar. Deste modo, há regiões no país que podem ter resultados ainda melhores do que os obtidos neste trabalho.

Para trabalhos futuros, seguem algumas sugestões:

- Estudar a aplicação do concentrador para aquecimento de outros tipos de fluido térmico, não somente para geração de vapor.
- Desenvolver um protótipo
- Controle de vazão mássica, de modo que a vazão seja alterada conforme a capacidade de vaporização momentânea.

6 REFERÊNCIAS

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A.. Solar Engineering of Thermal Processes. 4. ed. Hoboken - New Jersey: Wiley & Sons, Inc, 1980. 910 p.

SÁ, Alexandre Bittencourt de. OPTICAL AND THERMO-HYDRAULIC CHARACTERIZATION OF LINEAR FRESNEL SOLAR CONCENTRATORS OPERATING WITH DIRECT STEAM GENERATION. 2018. 221 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

PIGOZZO FILHO, Victor César. DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM CONCENTRADOR SOLAR FRESNEL LINEAR PARA GERAÇÃO DIRETA DE VAPOR. 2019. 248 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

BARDELIN, Cesar Endrigo Alves. Os efeitos do Racionamento de Energia Elétrica ocorrido no Brasil em 2001 e 2002 com ênfase no Consumo de Energia Elétrica. 2004. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo Escola Politécnica, São Paulo, 2004. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-23062005-084739/publico/DissertRacionamento.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2022.

BEM Interativo. Produção de Energia Primária. Disponível em: <http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/ben/>. Acesso em: 05 fev. 2022.

Tolmasquim, M. T., Guereiro, A., & Gorini, R. (2007). Matriz Energetica Brasileira - *Novos Estudos*, pp. 1-23.

Castro, N. J., Dantas, G. d., Leite, A. L., Brandão, R., & Timponi, R. R. (2010). Considerações sobre as Perspectivas da Matriz Elétrica Brasileira. *TDSE - Textos de Discussão do Setor Eletrico Nº 19*. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

ANEEL. Acompanhamento da Expansão da Oferta de Geração de Energia Elétrica - ANEEL. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/acompanhamento-da-expansao-da-oferta-de-geracao-de-energia-eletrica>. Acesso em: 06 fev. 2022.

Faria, Caroline. Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.infoescola.com/geografia/proinfa-programa-de-incentivo-as-fontes-alternativas-de-energia-eletrica/>. Acesso em: 06 fev. 2022.

GOV. Usinas eólicas respondem por 83% do acréscimo de potência no primeiro semestre de 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/07/usinas-eolicas-respondem-por-83-do-acrescimo-de-potencia-no-primeiro-semester-de-2021>. Acesso em: 06 fev. 2022

VALIATI, Melania I., RICIERY, Reinaldo P., “Estimativa da Irradiação solar Global com Partição Mensal e Sazonal para a Região de Cascavel – PR”, Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.1, p.76-85, jan. /abr. 2005

BINACIONAL, Itaipu. Itaipu tem produtividade recorde no primeiro trimestre de 2021. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/noticia/itaipu-tem-produtividade-recorde-no-primeiro-trimestre-de-2021>. Acesso em: 17 fev. 2022.

IBAMA. Ibama firma acordo com a Usina Belo Monte. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/noticias/2021/ibama-firma-acordo-com-a-usina-belo-monte>. Acesso em: 17 fev. 2022.

PACARAMBI, PCH. O que é PCH. Disponível em: <https://www.pchparacambi.com.br/o-empendedor/o-que-e-uma-pch/>. Acesso em: 17 fev. 2022.

VAZ, Luiz. Parque Eólico Lagoa dos Ventos: a atuação da VisãoGeo no maior da América Latina. Disponível em: <https://www.visaogeo.com.br/parque-eolico-lagoa-dos-ventos-a-atuacao-da-visaogeo-no-maior-da-america-latina>. Acesso em: 17 fev. 2022.

SÓGEOGRAFIA. Movimentos da Terra. Disponível em: <http://www.sogeografia.com.br/Conteudos/GeografiaFisica/Movimentos/>. Acesso em: 17 fev. 2022.

CÂMARA, Carlos Fernando. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA. 2011. 68 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011. Disponível em: <https://www.solenerg.com.br/files/monografia-Carlos-Fernando-Camara.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2022.

GÓIS, Pedro Igor de Souza. INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO E AZIMUTE DE SUPERFÍCIE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA CIDADE DE MOSSORÓ/RN. 2022. 9 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/5890/1/PedroISG_ART.pdf. Acesso em: 14 fev. 2022.

MARANHÃO, Diego Carvalho. PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CONCENTRADOR SOLAR TIPO FRESNEL LINEAR. 2016. 111 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/16593/1/2016_DiegoCarvalhoMaranhao_tcc.pdf. Acesso em: 07 nov. 2021.

MOTTA, Ricardo Henrique. Análise da influência de um Ano Típico Meteorológico na produção de energia de uma usina fotovoltaica. 2017. 104 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017. Disponível em: http://www.uel.br/ctu/deel/TCC/TCC2016_RicardoHenriqueMotta.pdfBhzKZFkOI7vV1. Acesso em: 14 fev. 2022.