CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

DISSERTAÇÃO

RUBENS RINCO CORRÊA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA APLICAÇÃO DE UM CONCENTRADOR LINEAR FRESNEL NA PRODUÇÃO DIRETA DE VAPOR PARA USO EM PROCESSOS INDUSTRIAIS.

Belo Horizonte
2023

RUBENS RINCO CORRÊA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA APLICAÇÃO DE UM CONCENTRADOR LINEAR FRESNEL NA PRODUÇÃO DIRETA DE VAPOR PARA USO EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima

Linha de Pesquisa: Eficiência Energética

Belo Horizonte
2023

Corrêa, Rubens Rinco
C824s Simulação numérica da aplicação de um concentrador linear Fresnel na produção direta de vapor para uso em processos industriais / Rubens Rinco Corrêa. – – Belo Horizonte, 2023.
105f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2023.
Orientador: Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima

Bibliografia

1. Energia Solar. 2. Vapor d'água. 3. Concentradores. I. Lima, Frederico Romagnoli Silveira. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 621.47

Elaboração da ficha catalográfica pela Bibliotecária Elisângela Gonçalves Barbieri CRB-6: 2624 / CEFET-MG

Rubens Rinco Corrêa

Simulação Numérica da Aplicação de um Concentrador Linear Fresnel na Produção Direta de Vapor Para Uso em Processos Industriais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Linha de Pesquisa: Eficiência Energética

Belo Horizonte, 13/12/2023

Resultado: APROVADO

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. André Guimarães Ferreira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Profa. Dra. Cristiana Brasil Maia
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Dedico este trabalho em memória de meus pais, o Sr. Antônio Corrêa, simplesmente chamado de “Corrêa” e da Sra. Dumitildes Rinco Corrêa, simplesmente chamada de “Dona Tila”, “Mestres da vida”, como forma de agradecimento pelo ensino do respeito mútuo e dos valores que hoje eu uso e guardo em mim. Por sempre entenderem e incentivarem a busca por conhecimento e do desenvolvimento humano, mesmo que não tiveram as oportunidades para estudar. Por sempre demonstrarem orgulho em todas as conquistas dos seus filhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu agradeço a minha família, minha esposa Andréa e aos meus filhos, Júlia e César, pela paciência e incentivo.

Ao meu orientador, o Professor Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima, pela grande contribuição e paciência por todo o tempo que foi dedicado e aos serviços prestados pela sua orientação durante todo o período da elaboração deste trabalho.

Agradeço também a todos os professores do Departamento de Engenharia Mecânica do CEFET – MG pelos ensinamentos durante o curso de Mestrado.

Aos conhecidos e amigos, que de alguma forma contribuíram nesta trajetória. Aos colegas de curso que tiveram caminhadas semelhantes e que, de alguma forma, compartilharam das mesmas angústias e dificuldades, mas que trabalharam firme para superar as barreiras que sugiram no decorrer dos trabalhos.

“Estamos na situação de uma criancinha que entra em uma imensa biblioteca, repleta de livros em muitas línguas. A criança sabe que alguém deve ter escrito aqueles livros, mas não sabe como. Não compreende as línguas em que foram escritos. Tem uma pálida suspeita de que a disposição dos livros obedece a uma ordem misteriosa, mas não sabe qual ela é.”

(Albert Einstein)

RESUMO

Com a crescente demanda por energia, se faz necessário adequar e integrar os processos de geração e de consumo da energia, observando as constantes transformações climáticas. Com isso, as organizações, de forma geral, necessitam integrar as questões ambientais aos seus planos de negócios, tendo que redirecionar e até redimensionar seus respectivos negócios, atendendo as novas regulações governamentais sobre o ciclo de vida de seus produtos. Colocar de forma clara e com responsabilidade as questões de causas e efeitos sobre os impactos ambientais de sua cadeia de produção. Neste trabalho foram realizadas simulações de um sistema de geração de energia térmica, através da plataforma *TRNSYS*-18, de um campo solar com Concentrador Linear Fresnel (CLF), operando para gerar vapor saturado de forma direta para atender aos diversos processos industriais com demanda de temperaturas até 150° C. O estudo consistiu, além das simulações, na determinação teórica das dimensões do campo solar para compor a matriz energética do segmento industrial como um todo. Foi realizada sua validação a partir de um protótipo já existente no laboratório LEPTEN da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para atender a demanda de energia térmica nos processos industriais. Ao fim, os resultados das simulações com *TRNSYS*-18 apontaram que o campo solar Fresnel possibilitou atingir a temperatura de parâmetro de 170,41°C para a produção direta de vapor saturado à pressão de 800 kPa, para demandas com temperaturas de processos reguladas até 150°C, as vezes de forma autônoma ou com fornecimento de energia adicional com uso de uma caldeira auxiliar. Após as análises das simulações foi realizada análise financeira para verificar a atratividade econômica do projeto. O CLF é construído em módulos, favorecendo atender demandas térmicas específicas em processos específicos. Isso permite atender tanto as demandas térmicas de pequeno até as demandas de grande porte. As simulações mostraram que em todas as regiões analisadas possuem as condições climáticas favoráveis para se instalar um campo solar com CLF.

Palavras-chave: Energia; Vapor; Concentrador Linear Fresnel; Matriz energética; *TRNSYS*.

ABSTRACT

NUMERICAL SIMULATION OF THE APPLICATION OF A LINEAR FRESNEL CONCENTRATOR IN DIRECT STEAM PRODUCTION FOR USE IN INDUSTRIAL

With the growing demand for energy, it is necessary to adapt and integrate energy generation and consumption processes, taking into account constant climate changes. As a result, organizations, in general, need to integrate environmental issues into their business plans, having to redirect and even resize their respective businesses, taking into account new government regulations on the life cycle of their products. Clearly and responsibly address issues of causes and effects regarding the environmental impacts of your production chain. In this work, simulations were carried out of a thermal energy generation system, through the TRNSYS-18 platform, of a solar field with a Linear Fresnel Concentrator (CLF), operating to directly generate saturated steam to meet the various industrial processes with energy demand. temperatures up to 150° C. The study consisted, in addition to simulations, in the theoretical determination of the dimensions of the solar field to compose the energy matrix of the industrial segment as a whole. Its validation was carried out using an existing prototype in the LEPTEN laboratory at the Federal University of Santa Catarina (UFSC) to meet the demand for thermal energy in industrial processes. In the end, the results of the simulations with TRNSYS-18 showed that the Fresnel solar field made it possible to reach the parameter temperature of 170.41°C for the direct production of saturated steam at a pressure of 800 kPa, for demands with process temperatures regulated up to 150°C, sometimes autonomously or with additional energy supply using an auxiliary boiler. After analyzing the simulations, a financial analysis was carried out to verify the economic attractiveness of the project. The CLF is built in modules, helping to meet specific thermal demands in specific processes. This makes it possible to meet both small and large thermal demands. The simulations showed that all regions analyzed have favorable climatic conditions to install a solar field with CLF.

Keywords: Energy; Steam; Linear Fresnel Concentrator; Energy matrix; *TRNSYS*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil de consumo de energia no Brasil 23
Figura 2 – Esquema de um campo solar CLF para geração direta de vapor (GDV) 28
Figura 3 – Esquema de fusões nucleares no Sol 32
Figura 4 – Caminho aparente do Sol na esfera celeste 33
Figura 5 – Esquema da radiação sobre a atmosfera e os objetos na superfície terrestre 36
Figura 6 – Variação da declinação solar 37
Figura 7 – Ângulos solares 38
Figura 8 – Esquema com ângulo azimute solar 39
Figura 10 – Modelo de concentrador de calha parabólica. SEGS I – Califórnia – EUA 43
Figura 11 – Esquema de concentrador de torre central 45
Figura 12 – Modelo de usina de prato parabólico. Ciclo Stirling, Arizona – USA 46
Figura 13 – Protótipo de concentrador linear Fresnel. Por Giovani Francia em 1964 48
Figura 14 – Esquema de reflexão de espelhos primários, plano e curvo 49
Figura 15 – Modelo de concentrador secundário de tubos múltiplos 50
Figura 17- Protótipo de concentrador linear Fresnel 51
Figura 18 – Esquema do circuito hidráulico do CLF LEPTEN 52
Figura 19 – Esquema de calha trapezoidal do concentrador secundário. (a) com janela de vidro. (b) Esquema do escoamento do fluido pelos tubos 53
Figura 20 – Tipos de recobrimento do tubo absorvedor. (a) calha parabólica e (b) “asa dupla” 53
Figura 21 – Ângulos de incidência básico (a) e modificados (b) sobre o concentrador solar 54
Figura 22 – Ângulos de incidência modificados em função das projeções do ângulo de incidência básico 55
Figura 23 – Plantas de CLF na Jordânia. (a) Ind. Farmacêutica e (b) Ind. De Tabaco 59
Figura 24 – Planta Fresnel para aquecimento de água. *MAGTEL* 59
Figura 25 – Planta Fresnel para geração de vapor em sistema híbrido – Herma 60
Figura 26 – Planta Fresnel sobre galpão para processos alimentícios 60
Figura 27 – Planta Fresnel para dessalinização 61
Figura 28 – Planta Fresnel em fábrica de cerveja HEINEKEN 62
Figura 29 – Dados de DNI no Brasil 63
Figura 30 – Efeitos da transferência de calor na calha trapezoidal 65
Figura 31 – Modelo geral da simulação para produção direta de vapor no *TRNSYS-18* 70
Figura 32 – Esquema de espaçamento entre espelhos. Espaçamento adequado (a) e com sombreamento (b) 77

Figura 33 – Esquema de erro de foco por altura excessiva (a) e com foco adequado (b) 78
Figura 34 – Geometria das reflexões solares no CLF 79
Figura 35 – Suporte de concentrador secundário 80
Figura 36 – Modelo de reflexão dos espelhos primários nos tubos múltiplos do concentrador secundário 81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Média das temperaturas, pressão de trabalho e consumo de vapor em processos industriais 30
Tabela 2 – Parâmetros termodinâmicos do vapor saturado 64
Tabela 3 – Parâmetros do protótipo LEPTEN – SC inseridos no modelo 71
Tabela 4 – Configuração básica do campo solar Fresnel com dados de entrada 73
Tabela 5 – Configuração da caldeira auxiliar e seus respectivos dados de entrada 73
Tabela 6 – Configuração dos trocadores de calor (processos) e respectivos dados de entrada 74
Tabela 7 – Resultados financeiros referentes ao investimento da compra de um CLF 95

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1– Diagrama V x T de uma substância pura 27
Gráfico 2 – Radiação direta no plano do coletor e total no plano horizontal 69
Gráfico 3 – Comparativo de energia produzida no CLF e da energia complementar do projeto modelado com os dados do LEPTEN – SC 71
Gráfico 4 – Comparativo das temperaturas na saída do CLF 72
Gráfico 5 – Custos de aquisição com GLP para produzir vapor em Caldeiras 83
Gráfico 6 – Custos de aquisição de campo solar Fresnel 85
Gráfico 7 – Perfil das temperaturas na saída do CLF período do verão 88
Gráfico 8 – Relação da energia produzida no CLF e do complemento da caldeira auxiliar no período de verão e da radiação disponível 89
Gráfico 9 – Perfil das temperaturas na saída do CLF período do outono 90
Gráfico 10 – Relação da energia produzida no CLF e do complemento da caldeira auxiliar no período de outono e da radiação disponível 90
Gráfico 11 – Perfil das temperaturas na saída do CLF período do inverno 91
Gráfico 12 – Relação da energia produzida no CLF e do complemento da caldeira auxiliar no período de inverno e da radiação disponível 92
Gráfico 13 – Perfil das temperaturas na saída do CLF período da primavera 93
Gráfico 14 – Relação da energia produzida no CLF e do complemento da caldeira auxiliar no período da primavera e da radiação disponível 93
Gráfico 15 – Economia anual com GLP, combustível do sistema auxiliar 94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparativo entre concentradores solares 41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABB	*Asea Brown Boveri*
BEN	Balanço Energético Nacional
CEFET – MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CEMIG	Centrais Elétricas de Minas Gerais
CLF	Concentrador Linear Fresnel
CCP	Concentrador de Calha Parabólica
CPP	Concentrador de Prato Parabólico
CRECESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
CSP	*Concentrated Solar Power*
CTC	Concentrador de Torre central
DEN	Departamento de Energia Nuclear
FC	Fluxo de Caixa
FT	Fluido Térmico
FTC	Fluido de Transferência de Calor
DGS	*Deutsche Gesellschaft für Sinnenenergie*
DNI	*Direct Normal Irradiance*
EPE	Empresa de Pesquisa Espacial
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IAM	*Irradiance Angular Modification*
INPE	Instituto Nacional de Pesquisa Energética
IRENA	Agência Internacional de Energia Renovável
IV	Infra Vermelho
LEPTEN	Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia
MTEP	Mega Tonelada Equivalente de Petróleo
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIR	*Near Infra-Red*
SEGS	*Solar Electric Generating Systems*
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e Custódia
SWIR	Short Wave Infra-Red
TAL	Tempo Local Aparente
TIM	*Total Irradiance Monitor*
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TMF	*Tagget Metric Font*

TRNSYS	*Transient Systems Simulation Studio*
UA	Unidade Astronômica
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USA	*United States American*
USP	Universidade de São Paulo
UV	Ultravioleta
VIS	Visível
VPL	Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Energia
h	Constante de Planck
C	Velocidade da Luz
λ	Comprimento de Onda Eletromagnética
I_s	Irradiação Solar
I_{cs}/E_0	Constante Solar
δ	Declinação Solar
N/n	Número do Dia no Ano
Θ_z	Ângulo Zenital
B	Ângulo de Inclinação do Coletor
Υ	Ângulo de Azimute da Superfície
Ψ	Ângulo Azimute Solar
λ	Ângulo de Longitude
ω	ângulo Horário
h_s	Hora Solar
α	Ângulo de Altitude Solar
θ	Ângulo de Incidência
Φ	Ângulo de Latitude
E	Equação do Tempo
T_{st}	Hora Local Padrão
L_{loc}	Hora Local
Y	Ponto Vernal
H_e	Elemento Hélio
H	Elemento Hidrogênio
S_i	Elemento Silício
O_2	Molécula do Elemento Oxigênio
O_3	Elemento Ozônio
G	Radiação Global
G_b	Radiação Direta
G_d	Radiação Difusa
G_r	Radiação Refletida ou Albedo
G_t	Radiação em uma Superfície Inclinada
G_{bn}	Radiação Direta Normal

G_{bt}	Radiação Direta em Superfície Inclinada
O	Oeste
L	Leste
N	Norte
S	Sul
q	Quantidade de Calor
ε	Índice de Emissividade da Superfície
σ	Constante de Stefan Boltzmann
A_s	Área da Superfície
K	Coeficiente de Condutividade Térmica por Condução
L	Comprimento da Seção de Transversal
ΔT	Gradiente de Temperatura
h	Coeficiente de Condutividade Térmica por Convecção
P	Índice de Refletividade dos Espelhos
Γ	Fator de Interseção pelo Absorvedor
T	Transmissividade da Cobertura do Vidro
A	Absortividade do Receptor
κ	Fator de Reflexão da Cavidade
e	Fator de Rugosidade do Tubo
l	Comprimento do Tubo
d	Diâmetro do Tubo
p	Passo da Transmissão de Calor ao Longo do Tubo
η_O	Rendimento Óptico
η_t	Rendimento Térmico
η_G	Rendimento Global de Conversão de Energia
A_c	Área de Concentração Solar
A_s	Área Sombreada pelo Tubo Absorvedor
A_i	Área Iluminada pela Radiação Refletida
A_u	Área Útil do Tubo Absorvedor
I_d	Irradiação Direta
P_{abs}	Potência Máxima Absorvida
P_{conv}	Potência Perdida por Convecção
P_{rad}	Potência Perdida por Radiação no Ambiente
P_u	Potência Útil Absorvida
Θ_n	Ângulo Entre o Foco e a Linha de Reflexão do Enésimo Espelho
ζ_o	Ângulo de Aceitação da Parábola Imaginária

W_{cs}	Largura do Total do Campo de Espelhos
W	Largura Individual de Cada Espelho
f	Altura do Foco
Θ_0	Ângulo de Incidência do Raio Refletido
Q_0/Q_1	Metades do Espelho Central
m	Total de Espelhos Primários
Cl_n	Concentração Individual em Função da Irradiação do Espelho
U_n, D_n, I_n	Porções da Largura dos Raios Refletidos no Absorvedor
E_{ef}	Energia Solar Efetiva Absorvida
q_c	Calor por Condução
q_{conv}	Calor por Convecção
q_r	Calor por Radiação
dt/dx	Derivada da Temperatura em Relação a Espessura
$T\infty$	Temperatura ambiente
T_s	Temperatura de uma Superfície
σ	Constante de Stefan Boltzmann
E_s	Energia Absorvida
E_{pe}	Energia Perdida
E_u	Energia Útil
m_v	Massa de Vapor
H_v	Entalpia do Vapor
H_l	Entalpia do Líquido Saturado
C_{pa}	Calor Específico da Água
T_{aa}	Temperatura da Água de Alimentação
V	Velocidade do Vapor
Δ_p	Perda de Pressão na Tubulação
μ	Coeficiente de Atrito
υ	Volume Específico
dT/dt	Derivada da Temperatura em Função do Tempo
t	Tempo
ρ	Densidade de uma Substância
J	Jaule
R_i	Raio Interno do Tubo Absorvedor
u	Velocidade Média do Fluido Térmico
h_{conv}	Coeficiente de Transferência de Calor por Convecção

T_{abs}	Temperatura do Absorvedor
E_{iner}	Energia de Inércia
E_{adv}	Energia de Advecção
T_s	Temperatura de Saída
T_{en}	Temperatura de Entrada
$T_{média}$	Temperatura Média
Tq	Tanque Acumulador
I_v	Investimento Inicial
N_{apb}	Número do Ano Anterior ao *PayBack*
FC_{Apb}	Fluxo de Caixa Atualizado no Ano de *PayBack*
FC_{apb}	Fluxo de Caixa do Ano Anterior ao *PayBack*
Q_s	Calor na Saída do Concentrador Linear Fresnel

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 20

2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA 22

3 OBJETIVOS 24
3.1 Objetivo Geral 24
3.2 Objetivos Específicos 24

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE 25
4.1 Software *TRNSYS* (Transient Simulation Systems) 25
4.1.1 Exemplos Usuais de Simulação Transiente com *TRNSYS*. 25
4.2 Geração direta de vapor d'água (GDV) 26
4.3 Energia Solar 31
4.3.1 Constante Solar 32
4.4 Radiação e geometria solar 35
4.5 Concentradores solares 40
4.5.1 Concentrador de Calha Parabólica (CCP) 42
4.5.2 Concentrador de Torre Central (CTC) 43
4.5.3 Concentrador Prato Parabólico (CPP) 45
4.5.4 Concentrador Linear Fresnel (CLF) 47
4.5.5 Rendimento Ótico no CLF 54
4.5.6 Rendimento Térmico e perdas térmicas no CLF 56
4.5.7 Projetos desenvolvidos para uso de CLF 57

5 METODOLOGIA 63
5.1 Determinação da energia absorvida teórica para produção de vapor estimada 64
5.2 Modelo térmico e balanço de energia 65
5.3 Simulação do CLF com o software *TRNSYS-18* 68
5.4 Validação do modelo desenvolvido no *TRNSYS-18* 70
5.5 Dimensionamento numérico do Campo Solar Fresnel 77
5.6 Determinação da distância entre espelhos e da altura do receptor 78
5.7 Determinação do concentrador absorvedor 80
5.8 Fator (Taxa) de Concentração (C) no CLF 81
5.9 Custos de produção de vapor em caldeiras 82
5.10 Análise de viabilidade do projeto de aquisição do CLF 83

6 RESULTADOS 88

7 CONCLUSÃO 97
7.1 Indicação de Trabalhos Futuros 98

REFERÊNCIAS 99

APÊNDICE A 103

1 INTRODUÇÃO

A energia é a base essencial e propulsão do desenvolvimento e do crescimento econômico de qualquer nação. No Brasil não é diferente, a necessidade por energia é sempre crescente e constante para qualquer atividade humana. Buscar e consolidar fontes de energias renováveis se faz presente no contexto atual, necessário e urgente. No setor industrial, a demanda por energia é o principal indicativo do nível de desenvolvimento do país. No Brasil, como nos países desenvolvidos ou em desenvolvimento, há certa semelhança no perfil de consumo de energia devido ao fato das economias destes países serem baseadas no segmento industrial. Para suprir a crescente demanda por energia se faz necessário aumentar sua oferta, necessariamente isso mobiliza o setor gerador de energia no Brasil em busca de novas fontes de energia que possam atender as demandas atuais e futuras. No entanto, o foco deve ser nas fontes de energias renováveis. Destas fontes renováveis de energia, disponíveis atualmente podemos destacar: fotovoltaica, em grande crescimento e com grande uso atual, eólica, biomassa, concentração solar para fins térmicos ou para geração de eletricidade, geotérmica, das marés, entre outras. A possibilidade de implementação de uma ou mais destas fontes depende não somente dos recursos renováveis disponíveis, mas, muito pelos investimentos públicos e privados disponíveis e dispostos a investir neste mercado. No Brasil existe um potencial muito grande para geração de energia de fontes eólicas e solar devido ao extenso litoral e de sua posição privilegiada nos trópicos, o que possibilita a captação da radiação solar durante todo o ano.

Neste contexto, este trabalho terá foco na energia solar, com a finalidade de simular um campo solar com Concentrador Linear Fresnel (CLF), através do software *TRNSYS-18*, como fonte de fornecimento de energia térmica, através da produção direta de vapor em um Concentrador Solar Linear Fresnel para processos do parque industrial brasileiro, passíveis de uso de calor na produção. Foi considerada a geração direta de vapor como fonte de calor para ser disponibilizada nos diversos processos onde demandam calor. As simulações se deram em quatro cidades brasileiras selecionadas, em função da importância local de cada uma delas e por cada uma representar sua respectiva região, tendo todas essas regiões um grande potencial industrial e disponibilidade favorável de radiação solar. Os dados climatológicos de cada cidade estão disponíveis pela plataforma *TRNSYS (Transient Simulation Systems)*, versão 18.

O vapor é uma fonte muito utilizada em diversos segmentos da indústria nacional, como: bebidas, automotivo, têxtil, eletrodomésticos, brinquedos, serviços etc. Por meio da simulação do campo solar CLF foram verificados os resultados, que permitiram verificar a viabilidade

técnica e econômica para uma provável substituição parcial do formato atual que as indústrias utilizam para gerar energia térmica ou com de um CLF com os modais energéticos atuais, permitindo uma migração gradativa ou promover uma combinação das novas fontes de energia com as atuais usadas.

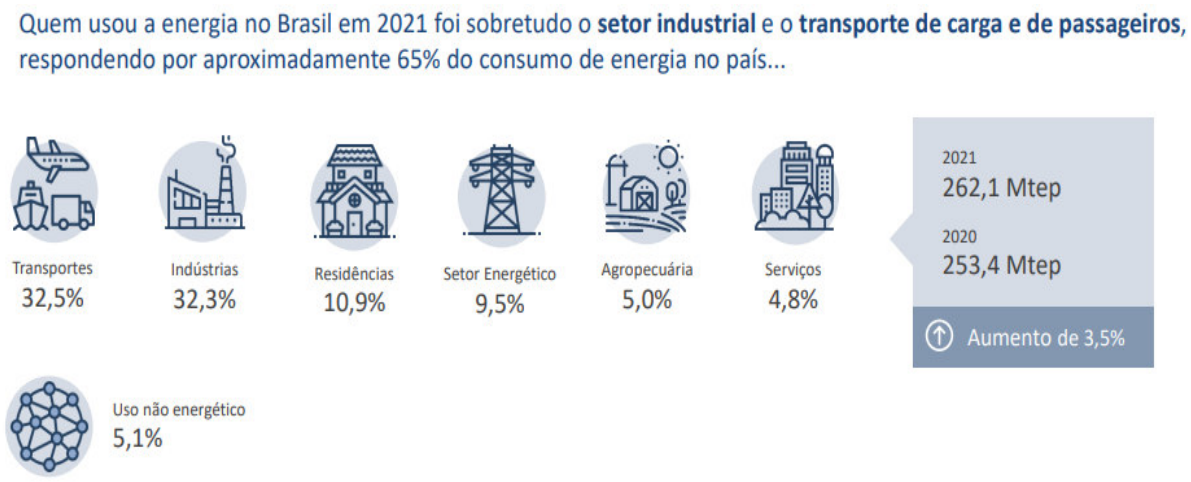
Os concentradores solares, em especial o CLF, mostrou-se uma boa opção para geração de energia térmica. Isso se deveu pelo fato de poder ser montado em módulos, atendendo demandas variadas, sejam grandes ou demandas pequenas. Desta forma, esforços e investimentos podem ser direcionados para otimizar e viabilizar o uso massivo destas novas tecnologias de energia renováveis. Quanto mais se desenvolver um sistema de campo solar CLF, mais a tecnologia se torna mais conhecida, usada e com reduções dos custos de implantação com diversificação das fontes de energia a serem disponibilizadas.

2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Além da crescente demanda brasileira por energia, somado a isso, o crescimento do uso de automóveis movidos a energia elétrica, o que eleva ainda mais as demandas por energia. No que tange as emissões de poluentes dos automóveis os chamados “carros elétricos” favorecem de forma bastante considerável na redução das emissões. No entanto, mesmo considerando aquisição em massa de veículos automotores movidos com energia elétrica, a busca da emissão zero é realidade distante, pois, as emissões dos veículos elétricos não seriam eliminadas, mas, tão somente deslocadas dos grandes centros urbanos para as localidades das fontes produtoras de energia elétrica. Na Figura 1 mostrado o perfil atual brasileiro de consumo de energia em seus diversos segmentos da economia. Em tese, o que ocorrerá é o deslocamento do uso de combustível fóssil do setor de transportes para o setor de geração de energia elétrica, elevando a utilização das usinas termelétricas. que normalmente queimam combustíveis fósseis e biomassas.

O segmento industrial brasileiro consome a maior parte do total de energia gerada, sendo que uma parcela dessa energia é usada para geração de calor de baixa, média ou alta temperatura em aplicações de processos fabris, denominados como: “*Calor de Processo*” (Duffie; Backman, 2013; Haberle *et al.,* 2006). O setor brasileiro de agropecuária consome 5,0% da energia disponibilizada, sendo que parte dessa energia é utiliza em processos de secagem de grãos em temperaturas inferiores a 100°C, o que indica a possibilidade de usar energia térmica obtida pela exploração da radiação solar, através da concentração solar.

Figura 1 – Perfil de consumo de energia no Brasil



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022).

Neste contexto, a geração de energia térmica através da concentração solar em um campo solar Fresnel, como mostrado neste trabalho, se torna um potencial considerável no fornecimento de energia térmica com geração direta de vapor saturado para processos do segmento agropecuário ou para os processos industriais, seja de forma direta ou indireta, neste caso, quando se usa trocadores de calor ou sistemas de radiadores pra efetuar troca térmica nos diversos processos dentro da indústria brasileira, promovendo a redução de emissões. Em alguns processos que demandam temperaturas até 150°C, como no exemplo de pasteurização e cozimento de alimentos (Brasil, 2023), o Concentrador Linear Fresnel mostrou-se ser adequado, pois, este tipo de concentrador pode se adequar as demandas variadas por seu perfil modular. Desta forma, vários setores da indústria podem se beneficiar com o uso de energia térmica proporcionada em uma planta de concentração com um CLF. Este permite gerar energia térmica de forma isolada, apenas com aproveitamento da radiação local ou com o concentrador integrado em sistema híbrido, conforme simulado neste trabalho, proporcionando continuidade na geração de vapor.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Desenvolver os cálculos teóricos para o adequado dimensionamento de um campo solar CLF e fazer sua validação através da simulação com o uso da plataforma *TRNSYS-18*, para produção direta de vapor em um campo solar CLF, dotado de sistema auxiliar de geração de vapor e mostrar atratividade econômica no desenvolvimento de um projeto com CLF para produção direta de vapor, visando contribuir para busca de alternativas viáveis e possíveis, para atender demanda de vapor a ser utilizado como *calor de processo* em indústrias do parque industrial brasileiro, independentemente do segmento e do porte. A intenção foi indicar o campo solar CLF como alternativa de fonte de energia térmica com a premissa de atender a demanda por energia térmica em processos que demandam temperatura até 150°C.

3.2 Objetivos Específicos

- Simular um CLF com uso do software TRNSYS-18 em projeto para atender demanda de energia térmica através da produção direta de vapor saturado e fazer sua validação, comparando com projetos já existentes e com o protótipo instalado no LEPTEN (Laboratório de Engenharia e Processos em Energia) da Universidade Federal de Santa Catarina;

- Dimensionar e comparar com os resultados encontrados, através de cálculos teóricos de um Concentrador Linear Fresnel com o projeto simulado na busca dos requisitos mínimos de potência e áreas totais de um campo solar para produzir vapor saturado, suficiente para atender processos diversos do setor industrial com demanda de até 150° C;

- Comparar a relação da potência instalada do CLF com a irradiação local disponível para cada cidade estudada neste trabalho e verificar se as dimensões totais do campo solar atendem as demandas de energia térmica nas regiões selecionadas dentro de suas respectivas regiões e verificar a viabilidade econômica do projeto.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE

4.1 Software *TRNSYS* (Transient Simulation Systems)

O software *TRNSYS* é um sistema que faz parte de uma série de sistemas de simulação transiente, baseado na programação FORTRAN. Esses sistemas também são conhecidos como “Sistemas de Simulação Dinâmica”. Este tipo de sistema é uma ferramenta computacional bastante utilizada para ajudar em desenvolvimentos de diversos projetos. Neles se é possível simular o comportamento de um sistema ao longo do tempo. A operacionalidade deste tipo de sistema de simulação transitória envolve a resolução de um conjunto de Equações diferenciais que descrevem a dinâmica do sistema sob investigação. As Equações diferenciais podem ser lineares ou não lineares e podem ser Equações diferenciais ordinárias ou Equações diferenciais parciais. Essas Equações são geralmente calculadas e resolvidas numericamente através do uso de técnicas como diferenças finitas, elementos finitos ou métodos de volumes finitos.

4.1.1 Exemplos Usuais de Simulação Transiente com *TRNSYS*.

- **Energia:** Simula o comportamento de sistemas de energia elétrica, incluindo geradores, transformadores, linhas de transmissão e cargas.

- **Químico:** Simula o comportamento de processos químicos, incluindo reações, separações e operações unitárias, como destilação e trocadores de calor.

- **Transporte:** Simula o comportamento dos sistemas de transporte, incluindo fluxo de tráfego, transporte público e logística.

- **Ambientais:** Simula o comportamento de sistemas ambientais, incluindo poluição atmosférica e da água, mudança climática e dinâmica do ecossistema.

No caso deste projeto com uso de um CLF usou-se simulações com o *TRNSYS-18*, sendo muito utilizado em projetos nas áreas de engenharia de energia renovável e na simulação de construção para projetos solares de diversos tipos e formatos. Esta plataforma foi desenvolvida na Universidade de *Wisconsin – USA*. É um software com vários recursos

que permitem realizar simulações e integrar através de conexões gráficas, fazer plotagens e montar planilhas. É uma ferramenta integrada que auxilia na montagem de um projeto desde sua concepção até uma simulação para analisar resultados como o exemplo de um concentrador solar Fresnel, motivo deste trabalho.

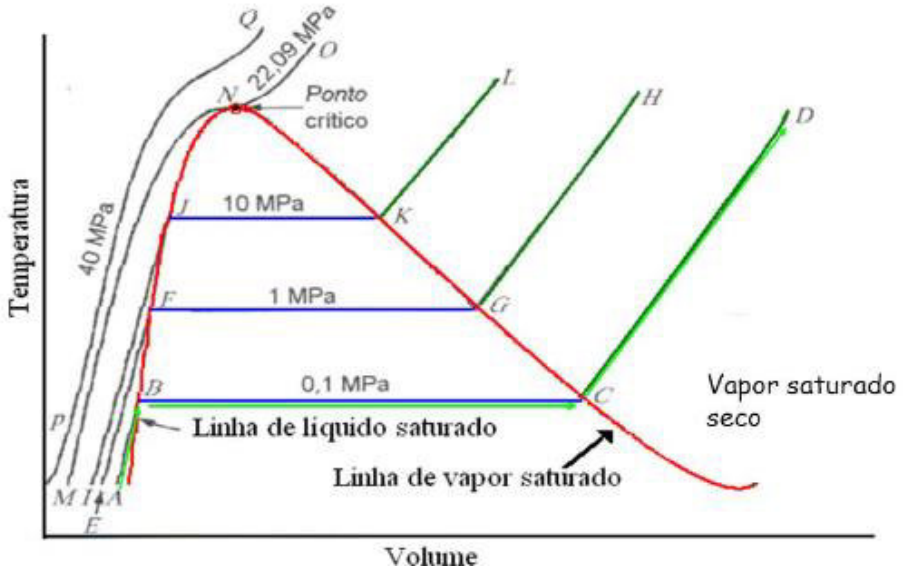
O método padrão para documentar modelos de componentes utilizado no *TRNSYS* é chamado “Proforma”. Trata-se do padrão de documentação do modelo usado no programa *simulation studio* e que é armazenado no formato *tmf*. Os arquivos “Proforma” são compostos por quatro painéis distintos. O primeiro painel contém informações gerais relacionadas ao histórico e função do modelo de componente a ser utilizado. O segundo painel contém a descrição do modelo em uso. No terceiro painel contém uma descrição detalhada de cada variável usada no modelo em questão com seus respectivos parâmetros, entradas, saídas e derivadas necessárias para identificar e definir o modelo com suas respectivas conexões a serem feitas com outros componentes do projeto específico. No quarto e último painel contém as conexões e ferramentas para trabalhar com arquivos associados ao modelo com objetivo de realizar uma simulação. Por meio do software *TRNSYS* pode-se modelar distintos sistemas transientes com uso de seus componentes modulares. Cada um dos componentes representa um processo físico ou recurso específico para a realização de simulações. Nos componentes encontram-se coletores solares térmicos de diversos formatos, trocadores de calor, controladores, reservatórios térmicos, componentes hidráulicos, geradores de vapor, condensadores, entre tantos outros componentes necessários aos diversos sistemas e respectivas simulações.

4.2 Geração direta de vapor d’água (GDV)

Atualmente o meio mais comum de geração de vapor é feito em caldeiras, sendo a caldeira um tipo de trocador de calor que trabalha com pressão superior à pressão atmosférica, produzindo vapor a partir da energia térmica fornecida por uma fonte quente qualquer (Nogueira; Rocha; Nogueira, 2005). As caldeiras podem ser do tipo acumuladora de vapor, que neste modelo mantém-se o sistema pressurizado com o acúmulo de vapor dentro do corpo da caldeira, o que lhe confere trabalhar de forma intermitente, em outro modelo usa-se uma geradora instantânea de vapor, neste modelo a caldeira permanece ligada em todo o período em que há demanda de vapor no processo. As caldeiras são constituídas por diversos equipamentos integrados para permitir a obtenção de seu maior rendimento térmico e com a maior segurança possível. Ao aquecer a água, transfere-se a energia dos gases provenientes

da queima de um combustível, seja esse de origem fóssil ou de biomassa, elevando a temperatura da água ao estado de vapor saturado. O vapor gerado é então distribuído para os pontos de consumo através de uma rede de distribuição (tubos, conexões, acessórios e instrumentações). Segundo Bizzo (2018), a maioria das instalações industriais utiliza vapor saturado, isso se deve ao fato de que ao se trabalhar nesse estado é possível ter um melhor controle dos processos que envolvem a utilização do vapor, uma vez que, durante a condensação do vapor, pressão e temperatura se mantém constantes. A maioria das caldeiras opera com temperatura máxima de 185 °C, com pressão de saturação em torno de 1000 kPa. No Gráfico 1 foi apresentado um diagrama com a relação entre temperatura, volume e pressão durante a produção de vapor.

Gráfico 1– Diagrama V x T de uma substância pura

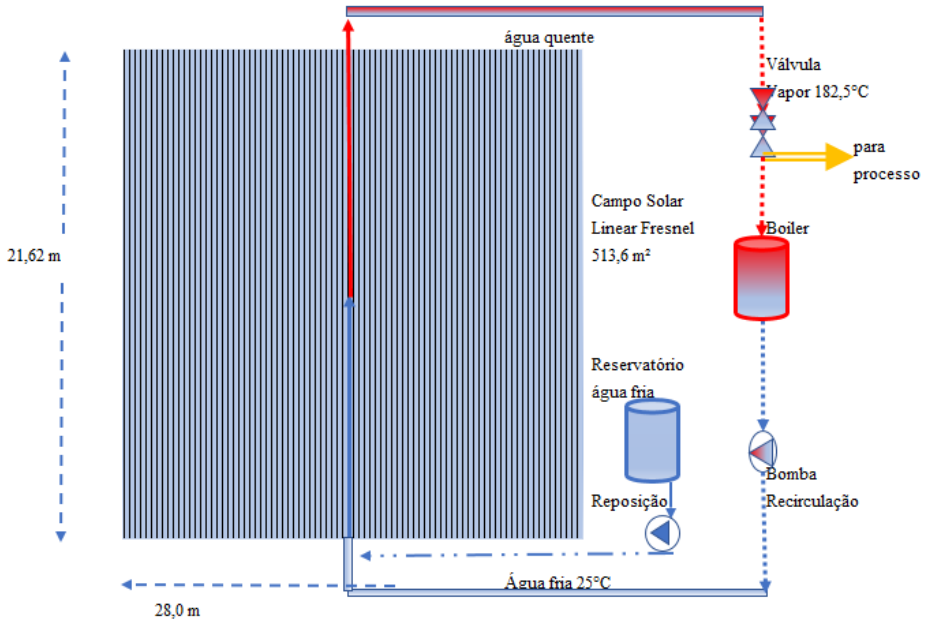


Fonte: Adaptado de Çengel e Boles (2013).

Segundo Pigozzo (2019) a utilização da água como fluido de trabalho para transferência de calor (FTC) em bloco de potência de sistemas de concentração solar levou os diversos especialistas da área a considerar o uso da água como o principal fluido térmico para realizar a transferência de calor em um campo de concentração solar. É importante destacar que o vapor d'água é utilizado como agente transportador de energia em diversos processos industriais e nas centrais termelétricas, isso se deve pelas vantagens de a água ser um produto abundante na natureza, possuir grande conteúdo energético, ser um elemento pouco corrosivo, não tóxico e não inflamável. Esta tecnologia de geração de vapor é chamada de

"*Geração Direta de Vapor*" (GDV) ou em inglês "*Direct Steam Generation (DSG)*". Os primeiros concentradores solares utilizados foram do tipo calha parabólica, como os utilizados por John Ericsson (século XIX) e o de Frank Shauman (século XX) eram do tipo "*DSG*", cujas potências térmicas eram de 373 W e de aproximadamente 40 kW, respectivamente. Neste último o sistema era utilizado para irrigação de lavouras no Egito. Segundo ainda Fernández-Garcia *et al.* (2010). Na geração direta de vapor, o pré-aquecimento, a evaporação da água e o superaquecimento do vapor, quando for o caso, ocorrem no campo solar. O pré-aquecimento é feito nas proximidades junto da entrada do campo solar, que aqui será considerado o primeiro trecho do campo solar, neste ponto ocorre o aquecimento da água até a temperatura de evaporação. Na seção de evaporação ou segundo trecho, o vapor saturado é produzido e segue para um separador de vapor ou um tanque de acumulação, onde se poderá misturar as fases vapor e água ou então será feito o superaquecimento, se for o caso de demanda por vapor superaquecido. O vapor segue então para a seção ou processo onde será utilizado, seja para troca de calor ou para gerar energia elétrica em um gerador movimentado por uma turbina. Um esquema simplificado de uma planta operando com *DSG*, a partir daqui geração direta de vapor (GDV) pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Esquema de um campo solar CLF para geração direta de vapor (GDV)



Fonte: Elaborado pelo autor

O processo de geração direta de vapor (GDV) proporciona como vantagens a eliminação do óleo sintético que é um componente tóxico, inflamável e mais caro do que a

água, elimina-se também os trocadores de calor, que são uma fonte de perdas térmicas promovendo a irreversibilidades no ciclo térmico e de todos os subsistemas do circuito de óleo existentes (Pigozzo, 2019). Os óleos sintéticos são os componentes que limitam a temperatura máxima de operação da planta em 400°C no processo conhecido de *Heat Transfer Fluid* (*HTF*) ou Fluido de transferência de calor (FTC). Por poder atingir temperaturas acima de 400° C o processo GDV com utilização de água é talvez a maior vantagem do processo GDV onde a temperatura de operação pode ser maior, o que aumenta a eficiência na conversão entre calor e trabalho (Zarza, 2003). A pressão de trabalho nos tubos para a GDV é maior do que quando se utiliza óleo, sendo necessária a utilização de tubos com paredes mais grossas, para isso segue-se a Norma DIN 2448 que estabelece os parâmetros relativos à seleção do tipo e dimensões dos tubos para condução de vapor. Nos concentradores Linear Fresnel (CLF) esse problema é menor, uma vez que o absorvedor é fixo e não há necessidade de usar juntas rotativas para interligações dos módulos Fresnel como nos módulos no CCP. Uma importante vantagem da tecnologia FTC sobre a GVD é a maior possibilidade de controle do título do fluido de trabalho na saída do trocador de calor. Nas plantas com FTC, não existe mudança de fase nos coletores, assim, por meio do controle da vazão de fluido permite o controle da temperatura de ajuste desejada na saída do campo solar com consequente controle de todo o sistema do circuito de hidráulico e nos trocadores de calor. No caso GDV, devido ao escoamento bifásico, se torna mais complexo o controle no campo solar na determinação do título do vapor na saída do campo. O controle do campo solar operando com geração direta de vapor podem ocorrer de três formas, como seguem: Passagem única, injeção e recirculação (Zarza, 2003). No formato de passagem única, água líquida subresfriada entra no campo solar e ocorrem os processos de pré-aquecimento, evaporação e superaquecimento em uma única passagem. Embora seja o modo mais simples e teoricamente barato, ocorre a necessidade de se ter um campo solar mais alongado para maior residência do fluido térmico no sistema de absorção da radiação solar, entretanto, conseguir controlar a qualidade do vapor na saída do campo solar se mostrou mais difícil Zarza (2003), pelo fato de uma usina possuir longas linhas de concentradores, ligados em paralelo. No formado de controle do título no modo de injeção, água líquida subresfriada é injeta ao longo do escoamento no absorvedor para controlar o estado do vapor na saída, mostrando ser um modo mais complexo, difícil mais oneroso, indicando resultados insatisfatórios (Valenzuela *et al.,* 2004). No formato de recirculação dentro do circuito hidráulico do concentrador solar utiliza-se seções separadas do campo solar, uma para o pré-aquecimento e evaporação e outra para o superaquecimento. Após a primeira seção, a mistura líquido-vapor, segue para um separador de vapor ou um tanque armazenador e misturador, neste tipo de tanque é possível fazer a separação das fases líquido e vapor, liberando o vapor para uso e promovendo a recirculação do líquido para novo repasse no

concentrador solar, quando se deseja apenas gerar vapor saturado. No caso de processo de produção de vapor superaquecido difere no processo onde o líquido é enviado para recirculação na seção inicial do concentrador solar e o vapor segue para a próxima seção do concentrador para ocorrer o superaquecimento. Neste modelo de operação consegue-se maior nível de controle, por outro lado, apresenta um gasto de energia extra com o sistema de recirculação (Valenzuela *et al.,* 2006).

Como parâmetros de valores ao adequado desenvolvimento do trabalho de simular um campo solar CLF para a geração direta de vapor usou-se a média de consumo de vapor para alguns dos segmentos industriais suas respectivas médias de pressão de trabalho, da mesma forma, no que se refere as temperaturas usuais nos processos industriais, quando se trata de usar calor de processos podemos observar as variações das temperaturas em função do tipo de indústria e do tipo de processo fabril, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1– Média das temperaturas, pressão de trabalho e consumo de vapor em processos industriais

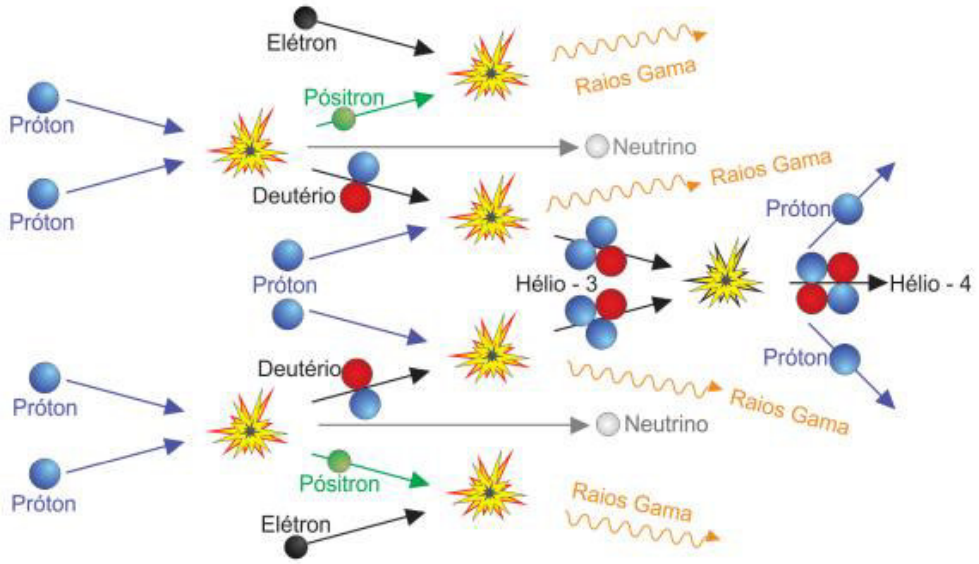
Segmento Industrial	Processos	Temperatura (°C)	Pressão de trabalho (kPa)	Consumo de vapor (kg/h)
Química	Ebulição	100	100 - 300	20 - 30
Carne	Lavagem, esterilização, limpeza, cozimento	60 - 100	150 - 300	50 - 170
Alimentos em conserva	Pasteurização, esterilização, cozimento, escaldamento, branqueamento	60 - 180	200 - 500	35 - 180
Bebidas	Secagem, cozimento, esterilização, pasteurização, limpeza	70 - 100	200 - 300	100 - 250
Máquinas	Limpeza	60 - 120	300 - 500	-
Mineração	Secagem de minérios, refino eletrolítico do Cobre	60 - 150	200 - 400	-
Têxtil	Termo fixação, lavagem, alvejado, secagem	60 - 180	150 - 500	100 - 400
Madeireira	Vaporização, cozimento, hidrólise ácida	60 - 170	200 - 500	-

Fonte: Adaptado de Kalogirou (2009); *Solarpayback* (2017).

4.3 Energia Solar

O Sol representa 99,867% de toda a massa do Sistema Solar e a restante está dividida entre os planetas, asteroides, satélites, e cometas do Sistema Solar (Kalvin, 2022), emitindo ao espaço diversos tipos de energia em consequência das suas reações nucleares: raio X, raio Gama, Neutrinos, Íons, dentre outras. A energia produzida pelo Sol é liberada a uma taxa da ordem de 3,8x10^{23} kW, sendo que apenas uma parcela disso, aproximadamente 1,7x10^{14} kW*,* chega na Terra. Apesar de ser uma parcela pequena em relação ao total de energia liberada pelo Sol, estima-se que aproximadamente 84 minutos de radiação solar que atinge a Terra seja equivalente a demanda mundial de energia em um ano (Kalogirou, 2009). O Sol é uma estrela formada de plasma, considerado o quarto estado da matéria. Ao se encontrar no estado de plasma a matéria atinge um estado de ionização, ocorrendo uma temperatura tão elevada que os átomos perdem elétrons, tornando-os livres. O Sol tem sua massa formada com cerca de 75% de Hidrogênio (H) e o restante de Hélio (He), Ferro (Fe), Silício (Si) e Carbono (C), podendo ser considerado um reator de fusão nuclear contínuo que, por sua grande força gravitacional, consegue reter os seus gases em temperaturas elevadíssimas. Conforme mostrado na Figura 3 a fusão nuclear é descrita como o processo no qual quatro núcleos de hidrogênio (prótons), em pares, colidem entre si mesmos, o que resulta um núcleo de deutério, um pósitron e um neutrino. Após as colisões com os elétrons os pósitrons são aniquilados, isso promove a emissão de fótons com alta energia (raios gama). Ainda durante o processo de fusão, cada núcleo de deutério colide com um próton, gerando um núcleo de He-3 com ocorrência de emissão de muita energia. Na última etapa do ciclo dois núcleos de He-3 se fundem formando um núcleo de He-4 e dois prótons livres, os quais iniciarão novamente o ciclo. (Oliveira Filho; Saraiva, 2014).

Figura 3 – Esquema de fusões nucleares no Sol



Fonte: Oliveira Filho; Saraiva (2014).

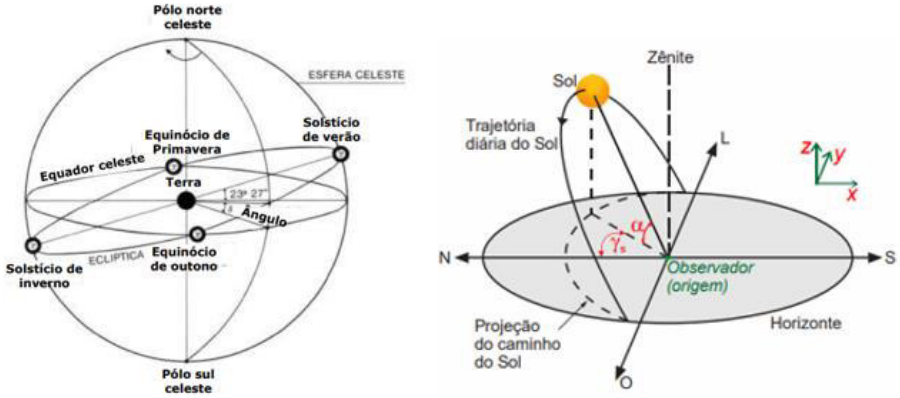
4.3.1 Constante Solar

Constante solar (I_{cs}) é a quantidade de energia (W) por unidade de área (m²) que atinge a superfície terrestre e em função do tempo (t) e que tem sua orientação perpendicular aos raios solares, situada na borda exterior da atmosfera terrestre, considerando a hipótese de não existir nenhum tipo de obstáculo entre o Sol e a superfície terrestre que possa provocar a redução dos raios solares. O fluxo de energia emitida pelo Sol e transmitida sob a forma de radiação eletromagnética, durante muitos anos foi considerada uma constante com valor de 1.365 W/m². No entanto, observações contínuas desde o final da década de 70 demonstraram variação em escalas de tempo de minutos nos valores da constante solar (Fröhlich, 2007). Em outra análise, segundo (Despotovic *et al.,* 2015), considerando a distância do Sol até a Terra e suas respectivas dimensões, implica em um ângulo de 32º, formado entre o centro do Sol e o diâmetro da Terra e as variações da constante solar, pode-se afirmar que a intensidade que os raios do Sol que chegam até a superfície exterior da atmosfera terrestre é praticamente a mesma, ou seja, uma constante. Esta constante é estimada atualmente com valor “médio” de 1.367 W/m², podendo variar em 3,5%. Esta variação é função da posição do Sol em relação a Terra e também da excentricidade da órbita da terrestre que tem diferenças de 1,5%, originadas das oscilações ou flutuações das manchas solares. As manchas solares são um

fenômeno cíclico relacionado à variação da atividade do Sol definida como "*zonas de menor temperatura*". O surgimento e desaparecimento das manchas solares tem uma duração aproximada de 11 anos, sendo possível ainda a ocorrência de ciclos de maior ou menor duração. O desaparecimento quase total das manchas solares indica um período de diminuição da atividade solar, o que provoca quedas das temperaturas médias da Terra em até 2,5 K (Vazzoler, 2021; Enteria; Akbarzadeh, 2013). O uso da potência solar ou fluxo radiante disponível (kW/m²) é uma função da posição do Sol e do seu melhor aproveitamento. Isso depende da observância e do conhecimento dos diversos conceitos relacionados a geometria solar para obter esse melhor aproveitamento da radiação solar. Tendo o conhecimento da potência solar e da geometria que relaciona a posição da Terra em relação ao Sol, pode-se projetar equipamentos e componentes para que estes permitam captar o fluxo solar disponível, como no exemplo dos Campos de Concentradores Solares.

A partir de um objeto situado na superfície da Terra ou, de um ponto de vista de um observador, tem-se a percepção de que é o Sol que se movimenta em torno da Terra, no decorrer de todo um dia, dia após dia e ano após ano. Isso ocorre em função dos movimentos de rotação e de translação da Terra e também da inclinação de seu eixo, em torno de 23º 27', resultando no "movimento aparente do sol". Esse movimento aparente é descrito como "uma série sucessiva na circunferência na esfera celeste, paralelas ao equador celeste, com inclinações sobre o plano do horizonte variando em função da latitude do observador na Terra", conforme indicado na Figura 4. Esta trajetória recebe o nome de Eclíptica, que é a representação do movimento anual aparente do Sol que se dá numa grande circunferência que está inclinada de acordo com a inclinação da Terra em relação ao Equador (Boczko, 1984).

Figura 4 – Caminho aparente do Sol na esfera celeste



Fonte: Adaptado Medeiros; Martins (2020); Vazzoler (2021).

A energia solar térmica, também chamada de energia solar concentrada tem a sigla em inglês *CSP (Concentrating Solar Power*), caracterizando-se pela utilização de coletores concentradores formados por espelhos que concentram a radiação solar, aumentando o fluxo de energia incidente (W/m²), possibilitando atingir as temperaturas mais elevadas quando comparado a coletores solares planos. A conversão da energia solar em energia elétrica feita através de ciclos térmicos de potência, como os ciclos de *Rankine, Brayton*, entre outros. Os concentradores solares refletem os raios solares e concentram a radiação em um elemento absorvedor por onde escoa um fluido térmico de trabalho. Este fluido, após passar pelo campo solar, através dos concentradores, é enviado ao bloco de potência, quando for usado para gerar energia elétrica ou para ser usado como fonte de calor em processos produtivos. As principais tecnologias de concentração solar atualmente utilizadas são: Concentrador Linear Fresnel (CLF), concentrador de calha parabólico (CCP), concentrador de torre central (CTC) e concentrador de prato parabólico (CPP). O CLF e o CCP são concentradores do tipo de concentração linear, enquanto o CTC e o CPP são concentradores pontuais. Os concentradores lineares Fresnel são também referidos, na literatura internacional especializada, pelas siglas em inglês *LFC e LFR*, *Linear Fresnel Concentrator e Linear Fresnel Reflector*, respectivamente, enquanto os concentradores de calha parabólicas ou cilindros parabólicos pela sigla *PTC, Parabolic Trough Concentrator*.

Os concentradores lineares, de calha parabólica e linear Fresnel, concentram a radiação em um absorvedor linear, geralmente um ou mais tubos, por onde escoa o fluido de trabalho. No concentrador cilindro parabólico a radiação solar é refletida por um espelho parabólico para o foco, onde situa-se o elemento absorvedor. Nos concentradores lineares precisam rotacionar os espelhos em seu eixo longitudinal para, continuamente, refletir a radiação solar para o absorvedor, acompanhando o movimento do sol. Das quatro tecnologias citadas, a do concentrador cilíndrico parabólico é a mais desenvolvida e utilizada até hoje. As primeiras plantas comerciais foram construídas durante a década de 80 e até hoje algumas delas continuam em operação. Estas plantas, conhecidas como *SEGS (Solar Electricity Generation System*), são um conjunto de nove usinas totalizando uma capacidade instalada de 354 MW elétrico (Patnode, 2006). As *SEGS* utilizam óleo como fluido de trabalho no campo solar, e o vapor é gerado em trocadores de calor onde recebem o calor do óleo. Esta tecnologia é conhecida pela sigla *HTF* (*Heat Transfer Fluid*), que daqui em diante será Fluido térmico de transferência de calor (FTC). Quando se usa o óleo sintético com fluido térmico ele é aquecido no campo solar à temperatura máxima de até quase 400°C e o vapor é gerado nos trocadores de calor, para então seguir para a turbina, percorrendo um ciclo de *Rankine.* O emprego de sais fundidos, água, ar, CO_2 entre outros, como fluido de trabalho vem sendo pesquisado por vários grupos de pesquisa, pois permitiria operar com temperaturas mais elevadas. Quando

água é utilizada como fluido de trabalho a tecnologia é conhecida como geração direta de vapor (GDV), ou *Direct Steam Generation (DSG)*.

4.4 Radiação e geometria solar

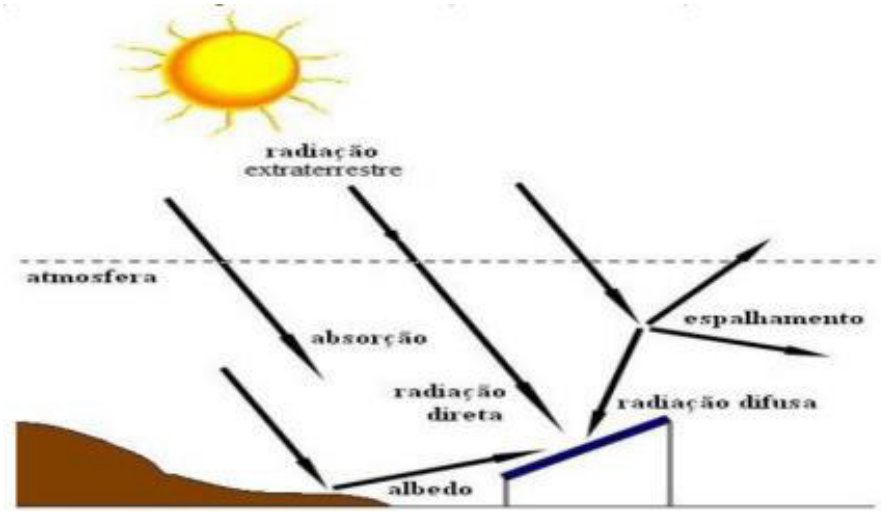
Radiação Global (Gt) – É a radiação total que atinge a superfície da Terra após esta ter sofrido várias intervenções e desvios em sua trajetória pelo espaço e após penetração na atmosfera terrestre. Essa radiação sofre uma série de interferências e processos ao entrar em contato com a atmosfera terrestre, parte dela é absorvida por agentes existentes na atmosfera, Ozônio (O_3) que absorve em torno de 0,5 a 3% da radiação extraterrestre, Oxigênio (O_2) e Nitrogênio (N_2) absorvem em torno de 6 a 8% dela, vapor d'água (H_2O) em torno de 3% a 9%, partículas diversas suspensas absorvem de 1,5% a 10%. Parte desta radiação, de 1,6% a 11%, é difundida de volta para o espaço por todos estes elementos citados e a difundida para a Terra em torno de 5% a 26% desta parcela (Stine e Geyer, 2001).

Radiação Direta (Gb) – É a radiação proveniente do Sol que incide diretamente sobre o objeto exposto, é a fração da radiação solar que atravessa a atmosfera sem qualquer interação conforme indicada na Figura 5. É a radiação direta é que considerada para efeito de cálculos e dimensionamento de um campo solar.

Radiação Difusa (Gd) – É a fração da radiação que incide sobre o objeto exposto de forma indireta que resulta da ação da difração das nuvens, impurezas em suspensão, nevoeiros, ou ainda outros obstáculos que possam interferir na ação direta da radiação sobre o objeto em questão, indicada na Figura 5.

Radiação Refletida ou de Albedo (Gr) – É a radiação proveniente da reflexão da luz solar sob uma superfície qualquer, ela é dependente do tipo da superfície refletora e das suas características óticas, conforme indicada na Figura 5. Em torno de 30% da energia solar é refletida de volta para o espaço. A reflexão ocorre na interface de dois meios distintos, quando parte desta radiação atingir esta interface é enviada de volta.

Figura 5 – Esquema da radiação sobre a atmosfera e os objetos na superfície terrestre



Fonte: CRECESB (2023).

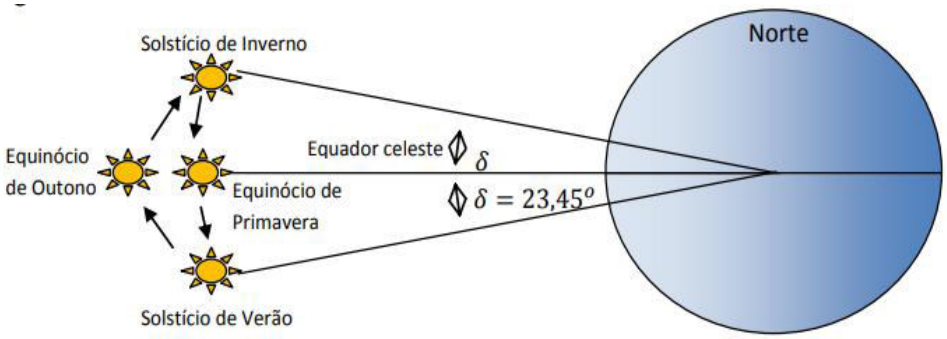
Ótica dos Refletores - Baseado na lei da reflexão, um raio de luz emitido sobre uma superfície, sendo essa reflexiva, será refletido com o mesmo ângulo que recebeu em relação a um vetor normal à superfície. Isto vale tanto para superfícies planas como para superfícies curvas e respectivas representações dos ângulos de incidência e de reflexão sobre uma dada superfície.

Nos trópicos, as geometrias na orientação a Norte e a Sul favorecem um melhor aproveitamento do Sol ao longo do ano. Isso é possível porque durante o verão, período que o Sol está mais alto em relação a linha do horizonte, incide com menor intensidade nas superfícies da envoltória orientadas do Norte para o hemisfério Sul do que naquelas orientadas a Leste e Oeste. Durante o inverno, período que o Sol está mais baixo em relação a linha do horizonte, a incidência nas superfícies orientadas a Norte para Sul é maior do que nas orientadas a Leste e Oeste. Com esses conhecimentos será possível indicar qual a posição mais adequada a se montar um campo solar no intuito de buscar a melhor eficiência do sistema. No entanto, se faz necessário ter o conhecimento dos ângulos solares e respectivas importâncias, como seguem:

Declinação solar (δ) – É a distância angular do Equador ao paralelo do astro em análise, é o arco do meridiano do astro compreendido entre o plano do Equador celeste e o astro. É o nome que se dá ao ângulo formado entre o plano equatorial terrestre até o centro do Sol (δ), esse ângulo varia ao longo do ano entre -23,27’$\leq \delta \leq$ 23,27’. A declinação solar é responsável pela diferença da posição aparente do Sol para a mesma hora dos distintos

dias que tem como consequência diferentes níveis de insolação diária, de acordo com cada estação do ano (Almeida, 2013). Ela pode ser determinada através da Equação 1 e mostrada na Figura 6.

Figura 6 – Variação da declinação solar



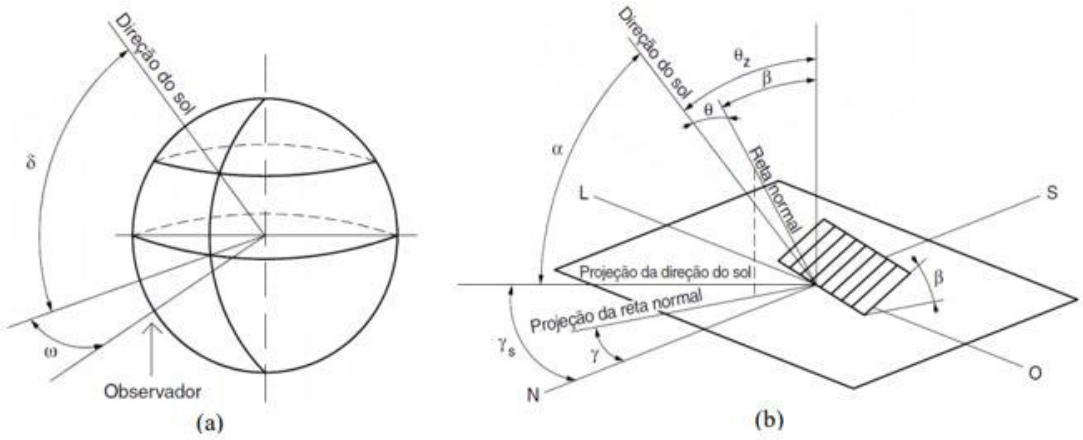
Fonte: Silva (2010).

$$\delta = 23{,}45 \text{ x } \operatorname{sen}\left(360 \,.\, \frac{\mathrm{N} + 284}{365}\right) \qquad (1)$$

Sendo N o número do dia no ano.

Estão mostrados na Figura 7 (a) e (b) um esquema resumido com os principais *"Ângulos Notáveis"* da geometria solar. Os símbolos e terminologia foram adotados pela ABNT NBR 10899:2013 relacionados com a geometria entre Sol e Terra. Nesta Norma considera-se que a superfície receptora da radiação solar está fixa com face ao Norte geográfico ou verdadeiro. Orientação esta, adequada para superfícies localizadas no hemisfério Sul.

Figura 7 – Ângulos solares



Fonte: ABNT NBR 10899 (2013).

Ângulo Zenital (θ_z) - Erro! Fonte de referência não encontrada. (b) é o ângulo formado e ntre a vertical do lugar (zênite) e a linha de referência, ou ângulo formado entre a vertical, normal a cabeça do observador e a linha do Sol. É o ângulo de incidência da radiação direta sobre a superfície horizontal na Terra que varia: $0° \leq \emptyset z \leq 90°$.

Ângulo de inclinação do Objeto (β) – **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (b) é o ângulo de orientação do coletor solar, é definido de acordo com o norte verdadeiro, também chamado de norte geográfico. Para encontrar o norte verdadeiro, basta girar o norte magnético (aquele que a bússola apresenta) de 18 a 20° para o leste (direita). É o ângulo formado entre a superfície do objeto (coletor) e o plano horizontal. Tem variação entre $0° \leq \beta \leq 180°$. Se β = 90° indica que a superfície é vertical, na linha das paredes da edificação. Se β > 90° indica que a superfície do objeto está virada para baixo.

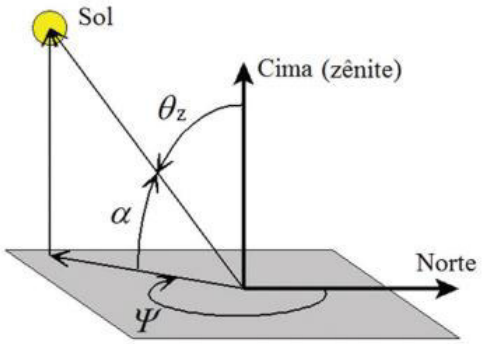
Ângulo Azimute da superfície (γ) – **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (b) é o ângulo formado entre o Norte e o alinhamento. Esse ângulo varia de 0º a 360º [0°(S), 90°(O), 180°(N), 270°(L)]. No sistema azimutal, rumos que diferem em + 180º equivalem à mesma direção. É o ângulo formado entre o eixo Norte – Sul e a Normal da superfície projetada sobre o plano horizontal, o ângulo é dependente da posição da referência adotada com valor 0° tanto na direção Norte quanto na direção Sul e é crescente no sentido horário.

Ângulo horário (ω) – Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (a) está r epresentado o deslocamento angular do Sol nas direções Leste – Oeste, relativo ao meridiano local, provocado pela rotação da Terra sobre seu eixo a cada 15° por hora, O ângulo através do qual a terra giraria para trazer o meridiano do ponto de observação local diretamente sob

a direção do Sol (Kalogirou, 2009). Em outras palavras, é o ângulo entre o meridiano local e o meridiano do planeta onde naquele momento é meio-dia. Desta forma, ao meio-dia o ângulo horário é zero, pela manhã assume valores negativos e no período da tarde assume valores positivos (Kalogirou, 2009).

Ângulo Azimute solar $(\boldsymbol{\psi s})$ – É o ângulo formado pelo deslocamento angular em relação ao Sul, da projeção da radiação direta (linha do Sol), sobre a superfície plana, considerando sentido horário em relação ao Sul. Podem assumir os valores [0°(S), 90°(O),180°(N), 270°(L)]. As cartas solares podem ser interpretadas como a projeção das trajetórias solares ao longo da abóbada celeste durante todo o ano, conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Esquema com ângulo azimute solar



Fonte: Campos; Alcântara (2016).

Ângulo de altitude solar (α_s) – é o ângulo formado entre o plano do observador e o sol e o azimute, o ângulo entre o Norte e a posição do sol em planta, indicado na **Erro! Fonte d e referência não encontrada.**. Com base nessas informações é possível identificar na carta solar os elementos que representam a altitude e o azimute, é o ângulo formado entre a linha do sol, do ponto de vista do observador e do plano horizontal na Terra, ele é um ângulo complementar do ângulo zenital (Θ_z)

Ângulo de incidência (θ) – é o ângulo formado entre o feixe de luz que incide sobre o objeto e a sua normal ou o ângulo formado entre a normal da superfície e a direção da radiação direta ou da linha do sol, indicado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**. S egundo Duffie e Backman (2013), em um plano horizontal, o ângulo de incidência (θ) é o próprio ângulo de zênite (θ_z). O ângulo de incidência depende do local onde se encontra o observador ou objeto, indicado pelo ângulo da latitude (Φ), o dia do ano, indicado pelo ângulo

de declinação solar (δ), pela hora do dia, indicado pelo ângulo (ω) e pela inclinação da superfície, indicada pelo ângulo (β).

Latitude (Φ) – É o ângulo formado entre o plano do Equador e a superfície de referência, é a coordenada geométrica definida na esfera terrestre, é a distância medida do meridiano de Greenwich até a linha do Equador, medida em graus de 0° a 90° para o Norte (N) ou para o Sul (S), no Equador é igual a 0°.

Longitude (ʎ) – É o ângulo que varia de 0° a 180° para o Leste (L) ou para Oeste (O). É a medida até o Meridiano de Greenwich medida ao longo da linha do Equador, com relação ao centro da Terra. É a coordenada usada para definir o arco do Equador terrestre.

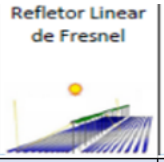
4.5 Concentradores solares

O uso de concentração solar não é novo, remonda da antiguidade clássica. Em pesquisa de alguns historiadores apontam que talvez Archimedes (282 a 212 A.C) tenha desenvolvido um sistema de concentração solar para uso na defesa da cidade de Syracuse, na Sicília contra os ataques romanos quando a ilha ainda fazia parte da Grécia. Embora não provado, o sistema de concentração solar desenvolvido por Archimedes teria queimado as velas de parte da frota romana com reflexão dos espelhos direcionados aos barcos localizados na baía de Syracuse (Kalogirou, 2009).

Os coletores concentradores são dispositivos que concentram a energia solar e direcionam a mesma para uma área específica de absorção, através de uma superfície espelhada e refletora, que direciona os raios solares na direção de um foco, ponto onde há um receptor, comumente tubular do qual escoa um fluido que absorve a energia térmica transmitida pela irradiação dos raios solares (Kalogirou, 2009). Um concentrador solar (CS) utiliza diretamente o fluxo irradiante para aquecimento do fluido pelas diferentes modalidades de transferência térmica: radiação, condução e convecção, maximizando a absorção da radiação solar incidente. O campo solar é normalmente composto por diversos espelhos que podem ou não acompanhar o movimento do sol (seguimento solar). Segundo Duffie e Beckman (2013), o uso do termo "*coletor solar"* se aplica ao conjunto completo do sistema de aquecimento, além dos espelhos inclui o receptor (concentrador). Existem vários tipos de concentradores solares, cada um com suas características específicas e aplicações. Quando se tratar especificamente do coletor absorvedor, pode-se conceituá-lo como sendo um tipo especial de trocador de calor que transforma o fluxo irradiante do Sol em calor. No entanto,

difere em vários aspectos dos trocadores de calor convencionais, pois a transferência de energia é proveniente de uma fonte distante de energia irradiante conduzida para um fluido, denominado de fluido térmico (Duffie; Backman, 2013). Segundo Kalogirou (2009), a classificação dos tipos de concentradores solares é determinada em referência as suas respectivas geometrias e do tipo de espelhos coletores utilizados: concentrador solar de calha parabólica (CCP), concentrador solar de torre central (CTC), concentrador solar de prato parabólico (CPP) e concentrador solar linear de Fresnel (CLF). Destes, o CCP e o CLF são construídos em linhas para concentração da luz do sol numa linha focal (tubos absorvedores), o CPP e CTC concentram a luz solar em um único ponto. Os coletores solares podem possuir mecanismo de seguimento do sol em dois eixos, aumentando sua captação da radiação e redirecionando os raios refletidos pelos espelhos para um ponto foco de interesse (Kalogirou, 2009). Na Figura 9 foi mostrado um quadro comparativo das principais tecnologias usadas atualmente nos campos solares e respectivas características operacionais.

Quadro 1 – Comparativo entre concentradores solares

				
Foco	**Pontual**	**Linear**	**Linear**	**Pontual**
Potência nominal (MW)	**10 -200**	**30 - 320**	**10 - 200**	**0,005 - 0,025**
Receptor	**Fíxo**	**Móvel**	**Fíxo**	**Móvel**
Fator de concentração	**300 - 1000**	**70 - 80**	**25 - 100**	**> 1000**
Temperatura de operação (°C)	**Até 600**	**Até 550**	**Até 300**	**Até 750**
Fluido de transferência de calor (FTC)	**Água, Sal fundido e Ar**	**Água, Óleo Térmico e Sal**	**Água e Óleo Térmico**	**Gás Hélio ou Hidrogênio**
Eficiência máxima de conversão solar - elétrica (%)	**20 - 38**	**23 - 27**	**18 - 22**	**29 - 31**
Eficiência global CS (%)	**7 - 20**	**11 -16**	**8 - 10**	**12 -25**
Consumo de água (l/MWh)	**2000**	**3000**	**3000**	**sem consumo**
Área (m^2/MWh)	**8 - 12**	**6 - 8**	**8 - 12**	**4 - 6**

Adaptado de Malagueta (2012); CRECESB (2023); Rungasamy; Craig; Meyer (2021).

4.5.1 Concentrador de Calha Parabólica (CCP)

Os coletores CCP têm a capacidade de interceptar e refletir a radiação solar incidente para o absorvedor em uma ampla faixa de ângulo (Jradi; Riffat, 2014). compreendendo um perfil refletivo internamente de dois lados parabólicos. A quantidade de radiação solar interceptada pelo concentrador está diretamente relacionada com o comprimento da abertura de entrada e o ângulo de aceitação, onde a abertura permite a concentração da radiação solar no absorvedor. Segundo Jradi e Riffat (2014), diferentes estudos investigaram o desempenho e a aplicabilidade de concentradores solares parabólicos compostos. As discussões concentraram-se na melhoria da eficiência deste tipo de concentrador através da introdução de novos materiais e técnicas para coletar e absorver a radiação solar com redução das perdas óticas e térmicas. Os tipos de concentradores usados em um CCP podem ser com um tubo absorvedor coberto por um tubo de vidro evacuado e acompanhado de um refletor externo ou com um absorvedor de tubo em formato de U de superfície com revestimento (superfície seletiva) e tampa transparente antirreflexos.

O concentrador CCP é a tecnologia de concentrador solar mais usual e mais madura na atualidade. É um tipo de concentrador linear montado em módulos, composto por linha paralelas horizontais alinhadas no eixo norte – sul. A concentração solar é realizada no refletor cilíndrico parabólico que concentra a radiação incidente em um receptor (absorvedor), localizado no foco da parábola. A superfície refletora tem formato de uma parábola para redirecionar a radiação solar em um ponto focal, conforme mostrado na Figura 9. Nesse ponto, é colocado um receptor que absorve a luz concentrada e a converte em energia térmica. Calhas parabólicas são comumente usadas em aplicações de geração de energia térmica (calor) e conversão dessa em eletricidade.

Figura 9 – Modelo de concentrador de calha parabólica. SEGS I – Califórnia – EUA



Fonte: Mitigation (2011).

O seguimento do sol é feito de leste a oeste, isso garante que a radiação, continuamente, seja focada no receptor linear. Um fluído de transferência de calor (FTC) é aquecido quando circula através do tubo absorvedor em direção ao processo de produção específico, para um trocador de calor com finalidade de transferir calor ou ainda para um bloco de potência, onde é usado para gerar eletricidade com uso de vapor a alta pressão e elevada temperatura que alimenta uma turbina convencional de vapor, essa então, acoplada a um gerador eléctrico. Após passar pela turbina o vapor é condensado e regressa para repetição do ciclo, que por sua vez, é conduzido novamente ao campo solar. Nos Estados Unidos da América foram construídas as primeiras plantas de campos solares com uso da tecnologia de concentradores de calha parabólica. Tiveram início de operação em meados da década de 80 no Estado Norte Americano da Califórnia. Lá está o primeiro complexo contendo um total de nove usinas, conhecidas como SEGS (*Solar Electric Generating Systems*). É apresentada na Figura 18 a primeira planta construída neste complexo do estado da Califórnia, chamada de usina de calha parabólica SEGS I (Mitigation, 2011). Atualmente há um maior direcionamento de investimentos em CCP por ser uma tecnologia madura e bem desenvolvida (Gunter, 2011).

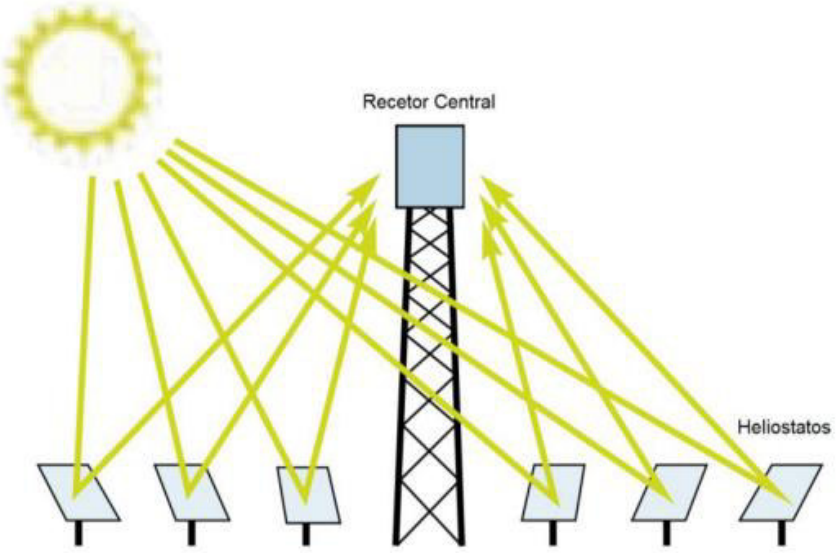
4.5.2 Concentrador de Torre Central (CTC)

É uma tecnologia de concentração solar pontual, que dispõe de um conjunto circular ou semicircular de heliostatos com seguimento individual. Os heliostatos são espelhos que ocupam posições específicas no campo solar, refletindo a radiação solar até o ponto foco da

torre, elemento para onde os raios solares são direcionados para um ponto (foco) sobre o qual incide a projeção da radiação (raios solares) refletidos pelos espelhos, mostrado na Figura 10. O CTC pode ser usado para entradas extremamente altas de energia radiante, refletindo os raios incidentes no campo solar diretamente em um alvo comum. O sistema de CTC usa um tipo de espelho ligeiramente côncavo no campo solar, permitindo o direcionamento de elevadas quantidades de energia térmica na cavidade de um gerador de vapor para produzir vapor superaquecido em alta temperatura e pressão (Mahesh; Venkatrami; Sreedhar, 2015). O fluxo solar médio incidente no receptor de um CTC favorece o atingimento de valores de energia entre 200 e 1000 kW/m². A energia térmica concentrada absorvida pelo receptor é transferida para um fluido circulante que pode ser armazenado e posteriormente usado como energia térmica ou para produzir energia elétrica, tendo algumas vantagens como a de coletar a energia solar e transferi-la para um único receptor central, podem atingir elevadas taxas de concentração, em torno de 1000 *sóis* e são altamente eficientes, tanto na coleta de energia quanto na conversão em eletricidade, são melhores para armazenar energia térmica de forma mais apropriada. É um sistema geralmente grande, com capacidades acima de 10 MW de potência, permitindo seu uso em trabalhos e economias de grande escala.

O tipo de fluido térmico usado em um sistema CTC pode ser: água / vapor, sais fundidos, sódio e ar. A escolha do tipo de fluido térmico é uma função da temperatura de trabalho a ser alcançada, em torno de 750 º C. Há projetos em desenvolvimento para atingir temperaturas de operação acima dos 1000º C (Silva, 2010). O sistema CTC é bastante complexo, pois necessita de acionamento de dois eixos para constantemente ajustar a posição dos heliostatos, de acordo com a posição do Sol, promovendo o acompanhamento da posição solar real. Um CTC é normalmente empregado para gerar vapor superaquecido que, por sequência é aplicado para acionar turbinas no ciclo de Rankine para geração de energia elétrica em usinas termoelétricas. No EUA tem uma CTC, "*Ivanpah Solar Electric Generating System*", com uma torre com 140 metros de altura, situada em área desértica de *Ivanpah*, na Califórnia, EUA, com capacidade instada de produzir 392 MW.

Figura 10 – Esquema de concentrador de torre central



Fonte: Almeida (2103).

Numa CTC é possível atingir uma taxa de captação de energia que excede o necessário para fornecer vapor à turbina. A partir disso, o sistema de armazenamento térmico pode ser carregado simultaneamente à produção de energia. A relação entre a energia térmica fornecida pelo CTC (coletor solar / receptor) e a potência térmica requerida pelo gerador elétrico, denomina-se de "*múltiplo solar*". Então, como exemplo, com um múltiplo solar em torno de 2,7 uma central de torre com fluido térmico de sais fundidos, como a existente no deserto de Mojave, Califórnia, pode ser projetada para um fator de capacidade anual de cerca de 65%. Sendo assim, a central pode operar 65% do ano sem a necessidade de backup devido fato de poder armazenar energia junto com a produção demandada. Na ausência de armazenamento de energia, as tecnologias de concentração solar ficam limitadas a um fator de capacidade anual de apenas 25% (Wagner, 2008).

4.5.3 Concentrador Prato Parabólico (CPP)

Uma CPP é geometricamente parecida com as antenas parabólicas dos quintais domésticos, pois, consiste em uma estrutura reflexiva em formato de um paraboloide de revolução, provido de sistema de seguimento solar em Azimute e elevação para poder refletir a radiação em um receptor térmico montado no ponto focal do paraboloide, conforme

mostrado na Figura 12. O CPP é montado em uma estrutura com dois eixos de movimentação que se ajustam de acordo com o movimento aparente do Sol. Neste sistema a eletricidade é produzida a partir da energia térmica concentrada e usada para movimentar um motor. O motor em questão é denominado de "*motor Stirling*", esse motor converte a energia térmica captada em energia mecânica, similar aos motores convencionais a gás ou Diesel, sendo instalado no receptor que se movimenta com toda a estrutura. Os ciclos termodinâmicos utilizados para estes sistemas incluem: Ciclo de Rankine, que usa água ou um fluído orgânico como fluido térmico; Ciclo de Brayton e Ciclo Stirling, sendo este último preferencialmente utilizado (SOLARPACES, 2023). É uma máquina térmica de ciclo fechado, sem a saída dos gases para o exterior do motor. O ciclo é considerado simples, pois funciona basicamente com a alternância entre o aquecimento e o resfriamento, expansão e contração do gás, em dois níveis de temperatura. É referido também como motor a ar quente ou motor de gás quente, por utilizar os gases atmosféricos como fluido de trabalho.

Figura 1 – Modelo de usina de prato parabólico. Ciclo Stirling, Arizona – USA



Fonte: Magacho Silva; De Castro (2019).

Este tipo de motor de ciclo termodinâmico Stirling funcionam em altas temperaturas (700º C) e altas pressões. Usam os gases de Hidrogénio ou Hélio como fluido de transferência de calor (FTC). O fluído de trabalho é, continuamente, aquecido e arrefecido num processo à temperatura e volume constante. O clico Stirling é composto de 4 fases e executado em 2

tempos do pistão: em primeiro lugar ocorre a chamada compressão isotérmica (temperatura constante), em seguida ocorre o chamado aquecimento isocórico (volume constante), depois a expansão isotérmica e no final o arrefecimento isocórico. O ciclo descrito é o considerado ciclo ideal que é válido para gases perfeitos, que diverge do ciclo real medido por instrumentos. O ciclo Stirling está muito próximo do chamado Ciclo de Carnot, que estabelece o limite teórico máximo de rendimento das máquinas térmicas. No estado Norte Americano do Arizona foi construída a primeira usina comercial do mundo desenvolvida com a tecnologia Stirling de concentração de energia solar em discos parabólicos gigantes para gerar eletricidade a partir do sol. Nela foram instalados 60 coletores-parabólicos solares, chamados de "*SunCatche*r". Cada unidade parabólica tem capacidade de produzir 25 kW com uma capacidade total equivalente a 1,5 MW de geração de eletricidade. Isso é o suficiente para suprir as necessidades energéticas de cerca de 200 residências.

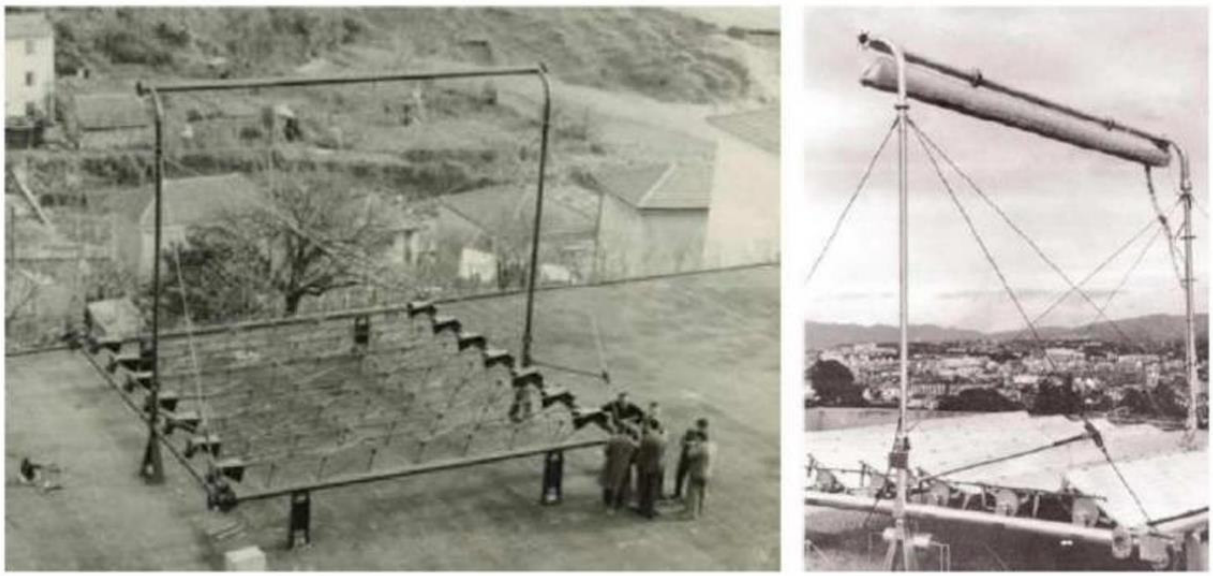
4.5.4 Concentrador Linear Fresnel (CLF)

Primeiramente é importante destacar um dado histórico sobre lentes Fresnel, porque tudo começou com a invenção do físico francês, Augustin Jean Fresnel (1788 – 1827), no início do século XIX, sendo ele considerado o fundador da ótica moderna. Fresnel analisou o comportamento da luz tanto de um olhar teórico quanto experimental, tendo dado grandes contribuições para esse campo de estudos, provando que a luz também se comporta como uma onda, tendo seus trabalhos desenvolvidos sobre o tema lhe garantindo ganhar um concurso na "*Académie des Sciences*", em Paris. Sabe-se hoje, no entanto, que a luz se comporta tanto como uma onda quanto como uma partícula. Fresnel desenvolveu um sistema de lentes progressivas formado por uma sucessão de anéis concêntricos, sendo cada um deles composto de uma lente simples, essas lentes de Fresnel concentravam luz em feixes, relativamente estreitos e era de fácil construção, sendo utilizadas em holofotes de faróis marítimos. Mais tarde, esse sistema foi utilizado em todo dispositivo que necessitava de feixes luminosos estreitos, tais como refletores, projetores, sinaleiras de tráfego terrestre, lanternas de navios, entre outros usos (Bassalo, 1988).

O primeiro concentrador solar com a tecnologia Fresnel foi construído e patenteado pelo matemático autodidata Giovani Francia, na Itália em 1964 (Zhu *et al.,* 2014). É mostrada na Figura 13igura 13 a fotografia do concentrador construído por Francia. Foi a partir deste protótipo que muitos outros concentradores refletores lineares Fresnel foram projetados e construídos, tanto que em 1979 o departamento Americano de Energia (DOE), após realizar

um extenso estudo da tecnologia de Concentradores Lineares Fresnel (CLF) levou a publicação conclusiva de que o concentrador CLF é uma tecnologia economicamente viável (Zhu *et al.,* 2014). Como consequência do referido trabalho a tecnologia Fresnel atraiu o interesse de muitos pesquisadores pelo mundo, transformando-o numa tecnologia de concentração de energia solar alvo de interesses nos últimos anos, sendo considerada bastante eficaz e promissora para aplicações térmicas solares de média temperatura. No entanto, ainda é considerada nova e está em desenvolvimento.

Figura 13 – Protótipo de concentrador linear Fresnel. Por Giovani Francia em 1964



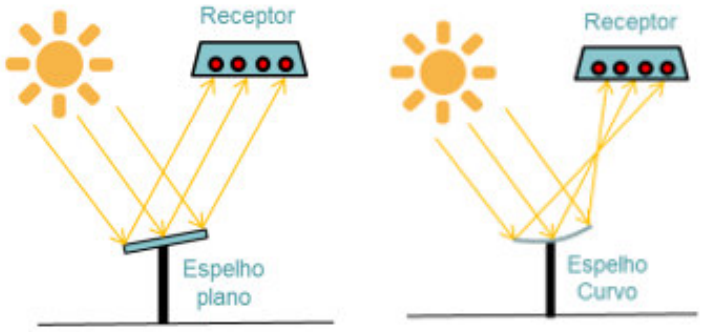
Fonte: Gunter (2011).

Atualmente a tecnologia de Concentradores Fresnel tem atraído o interesse de empresas que investem no setor de energias renováveis. Segundo Haberle *et al.* (2006), no início dos anos 2000, dois grupos empresariais retomaram o desenvolvimento da tecnologia CLF, sendo eles: "*Solar Heat and Power*" (Austrália), que posteriormente veio a se chamar "AUSRA" e a outra a "*Solarmundo*" (Bélgica). No ano de 2006, uma outra empresa se interessou neste nicho de mercado, é a empresa chamada "*Novatec Biosol*", que depois passou a ser a ser chamada de "*Novatec Sola*r", sendo que essa última se associou ao grupo suíço alemão "ABB (*ASEA BROWN BOVERI*)".

A operação do concentrador CLF é semelhante a operação do concentrador de calha parabólica (CCP). Sua configuração de área refletora é baseada em uma série de espelhos lineares, podendo ser planos ou ligeiramente curvos, geralmente em formato de tiras que refletem a radiação solar em um receptor em linha que se encontra montado acima dos

espelhos primários. Um típico CLF é composto por três partes, sendo: fileiras planas de espelho, um receptor de absorção de linha (tubo concentrador) e uma estrutura de suporte. O absorvedor é a parte mais crítica do concentrador CLF e seu adequado dimensionamento e instalação na linha receptora é vital para o adequado atingimento de seu melhor desempenho. Esse desempenho é uma função direta da eficiência de transferência do calor do tubo receptor para o fluido térmico de calor (FTC) circulante através da linha receptora. Vários trabalhos foram desenvolvidos para melhorar o desempenho do tubo absorvedor do coletor CLF, seja com uso de superfície seletiva ou encapsulando o absorvedor dentro de uma cobertura de vidro evacuada com objetivo de reduzir as perdas térmicas por convecção ((Jradi; Riffat, 2014)). Na possibilidade de usar espelhos primários em um CLF do tipo curvado favorece ao ganho da eficiência ótica, entretanto apresentam dificuldades construtivas que elevam seu custo de fabricação e ou aquisição (Benyakhlef *et al.,* 2016). Os diferentes tipos estão mostrados na Figura 14.

Figura 2 – Esquema de reflexão de espelhos primários, plano e curvo



Fonte: Benyakhlef *et al.* (2016).

A curvatura dos espelhos em um CLF é praticamente imperceptível, o tubo absorvedor ou conjunto de tubos absorvedores são instalados em altura devidamente calculada e especificada no ponto de foco para receber os raios refletidos dos espelhos primários. Na busca de melhor eficiência é comum a instalação de um concentrador secundário, conforme mostrado na Figura 15, que recobre o tubo absorvedor, promovendo uma melhor eficiência do sistema com maior captação possível da radiação e, por consequência, reduzir as perdas óticas comuns nesse tipo de modelo de concentrador solar.

Figura 15 – Modelo de concentrador secundário de tubos múltiplos



Fonte: LEPTEN/UFSC (2018).

Segundo Irena (2012) outra finalidade do concentrador secundário no CLF é o redirecionando os raios solares que não atingem diretamente o tubo absorvedor, reduzindo o efeito de astigmatismo (distorção) ou ainda conhecido como efeito *spillage*, efeito esse quando ocorre a distorção dos raios solares fazendo que eles não atinjam o sistema absorvedor compostos pela calha refletora e os tubos absorvedores. Outra forma para aproveitar os raios refletidos pelos espelhos é promover o aumento da área do concentrador através da utilização de um conjunto de tubos absorvedores em paralelo, que formam um receptor de tubos múltiplos, transformando a malha de tubos em um corpo mais largo e suficiente para interceptar ao máximo a radiação solar refletida nos espelhos, sem a necessidade, às vezes, de um concentrador secundário.

Segundo (Qiu *et al.,* 2015), a máxima eficiência ótica alcançada no CLF é 65% e a média anual é na faixa de 34,8% a 55,2% para diferentes latitudes. Essa indicação de eficiência é próxima da eficiência indicada nos módulos fabricados pela *Solatom*, empresa espanhola fabricante de módulos de concentradores lineares Fresnel e que indicam uma eficiência ótica de seus módulos de 63,2%.

O CLF possui a vantagem de poder ser mais viável para menores demandas de energia, principalmente energia térmica, visando os processos industriais que utilizam "*calor de processo*", possibilitando ser montado com menores estruturas, sendo possível serem instalados sobre edificações ou galpões industriais devido sua melhor distribuição de peso, isso faz com que ocupe menos espaço. No caminho do aperfeiçoamento da tecnologia CLF novos estudos e pesquisas estão em desenvolvimento. A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), divulgou que na cidade e capital do Estado, Florianópolis, um Concentrador do Tipo Linear de Fresnel (CLF) foi montado com uma área total de espelhos de 54m², tendo 5m de largura e 72m de comprimento. O protótipo do laboratório LEPTEN/UFSC tem a proposição de promover estudos e pesquisas com a intenção de promover redução do consumo de combustíveis fósseis com tecnologia nacional para a captação e uso da radiação solar. A Figura 17 mostra o protótipo instalado sobre uma edificação na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Figura 17- Protótipo de concentrador linear Fresnel

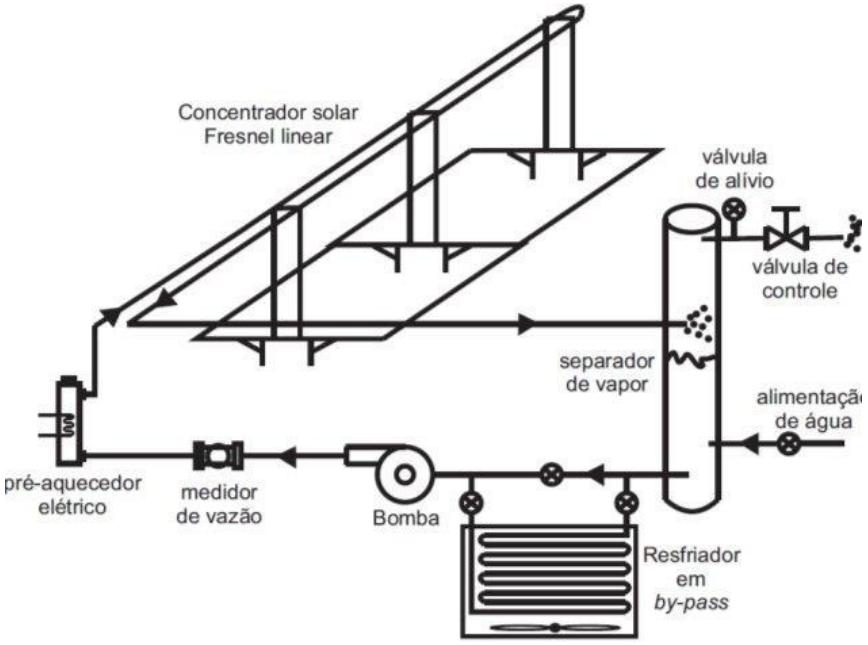


Fonte: LEPTEN/UFSC (2018).

Embora o CLF instalado na UFSC seja para geração direta de vapor, pode também ser utilizado para geração de energia elétrica, se acoplado a um sistema com turbina e gerador elétrico. Segundo Pigozzo *et. al.* (2018), os custos de implementação de sistemas com concentradores solares como um todo, sofreu uma redução na ordem de 50% nos últimos 20

anos. Isso é um indicativo claro de que as possibilidades do uso desta tecnologia, não somente já é viável como abre grandes possibilidades de desenvolvimento acelerado da tecnologia de CLF. Este sistema gera vapor saturado a temperaturas de até 220°C, usa sistema de rastreamento mono atuador que permite a movimentação simultânea das dez linhas de espelhos e conta também com um mecanismo que movimenta o sistema absorvedor no sentido longitudinal, a fim de minimizar as perdas de final de linha (Brogni *et al.,* 2017). A Figura 18 apresentou um esquema do circuito hidráulico da bancada do CLF da UFSC.

Figura 18 – Esquema do circuito hidráulico do CLF LEPTEN

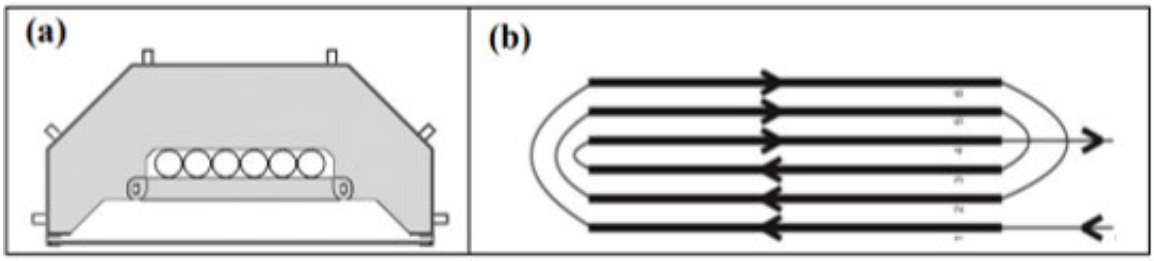


Fonte: Pigozzo *et. al.* (2018).

A calha trapezoidal que recobre os tubos absorvedores deste protótipo foi construída com chapas de Alumínio, usando proteção térmica de lã de rocha. Na parte inferior, abaixo da cavidade da calha trapezoidal foi instalada uma janela de vidro, mostrado anteriormente, altamente transparente para reduzir as perdas térmicas por convecção para o ambiente externo. Outra forma de se evitar as perdas térmicas por convecção no absorvedor é usar uma malha de tubos evacuados no receptor, isso reduz de forma significativa as perdas térmicas por convecção. O conjunto concentrador possui 06 (seis) tubos em paralelos, fabricados em aço inoxidável com diâmetro de 1”, esses tubos foram pintados com tinta seletiva para promover um melhor rendimento térmico e estão localizados dentro da cavidade trapezoidal. Os tubos do concentrador são conectados em série e o fluido de trabalho escoa

no sentido dos tubos mais periféricos para os mais centrais do absorvedor dentro da cavidade da calha trapezoidal, mostrada na Figura 19. Como cada tubo tem 12m de comprimento o fluido escoa por um comprimento total de 72m. Outras dimensões importantes do CLF são: distância de 0,15m entre as linhas dos espelhos primários, 0,40m a largura de cada espelho, largura total do campo solar é 5m e altura do ponto foco é de 5m.

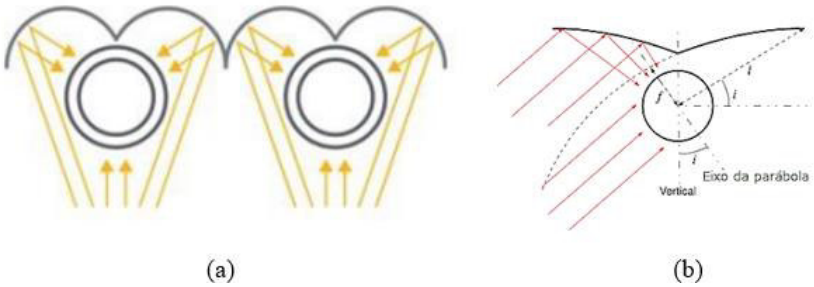
Figura 19 – Esquema de calha trapezoidal do concentrador secundário. (a) com janela de vidro. (b) Esquema do escoamento do fluido pelos tubos



Fonte: Pigozzo *et. al.* (2018).

Há outros estudos na busca de melhorar a eficiência na captação da radiação em um CLF. Um destes estudos propõe obter mais eficiência com uso de uma calha de recobrimento do Absorvedor feita com geometria idêntica a um concentrador de calha parabólica (CPC) em detrimento da calha trapezoidal. Os estudos apontaram uma eficiência ótica máxima de 61% (Bellos; Tzivanidis; Papadopoulos, 2018). Já em outra linha de pesquisa (Grena; Tarquini, 2011), idealizaram um concentrador secundário de geometria denominada de “asa dupla”. Segundo seus idealizadores o projeto permite atingir temperaturas na ordem de 500º C no CLF, temperatura essa ocasionada pelo fluxo de calor uniforme apresentada neste formato, conforme mostrado na Figura 20.

Figura 3 – Tipos de recobrimento do tubo absorvedor. (a) calha parabólica e (b) “asa dupla”



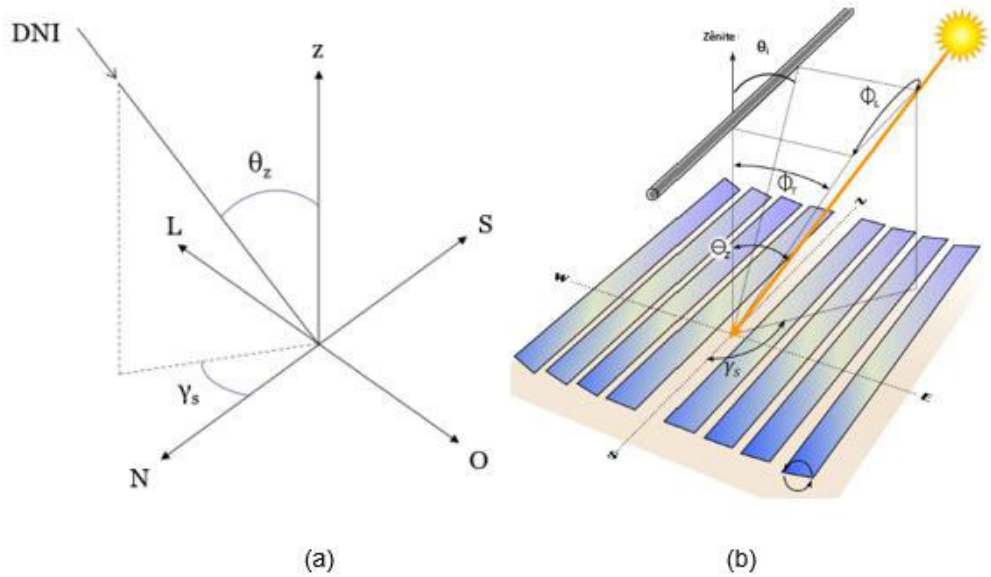
Fonte: Adaptado (a) Industrial Solar GmbH (2023); (b) Grena; Tarquini (2011).

4.5.5 Rendimento Ótico no CLF

O desempenho ótico em um CLF, tem relação direta com a geometria solar e seus respectivos ângulos, como no caso do ângulo de incidência (θ), que tem variação no decorrer dos dias e do ano. Esse ângulo tem projeções em dois planos, no plano longitudinal (θ_L) e o plano transversal (θ_T). O ângulo é dito ângulo (θ_L) quando o ângulo de incidência é projetado no plano entre o zênite e a direção Sul para Norte, já o ângulo (θ_T) é a projeção do ângulo de incidência no plano formado entre o zênite e a direção Leste para Oeste que mostra a posição relativa do coletor com o Sol na direção Sul para Norte e a posição do Sol com o coletor na direção Leste para Oeste. A posição é definida pelos ângulos de azimute solar e do ângulo zenital (θ_z). Esse é o ângulo de conexão da linha do Sol à vertical, assumindo valor entre 0° e 90°, conforme mostrado na Figura 21. O valor do ângulo azimute é calculado pela diferença dos valores do azimute solar com o azimute do concentrador, conforme a Equação 2.

$$\gamma = \psi_s - \Upsilon_{conc} \qquad (2)$$

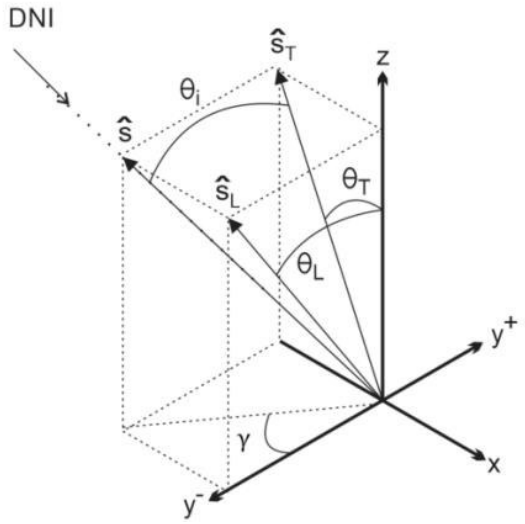
Figura 21 – Ângulos de incidência básico (a) e modificados (b) sobre o concentrador solar



Fonte: Adaptado Pigozzo *et. al.* (2018) e Zhu *et al.* (2014).

A partir da variação dos ângulos de incidência em função da posição do Sol podem ser calculados os ângulos de incidência transversais de longitudinais modificados conforme indicados na Figura 22. O ângulo de interesse para a movimentação dos espelhos para promover a correta reflexão da radiação solar direta para o absorvedor é o ângulo de incidência transversal θ_T. Os outros dois ângulos, θ_i e θ_L são de interesses para determinar as perdas de final de linha e o posicionamento longitudinal do absorvedor reduzir tais perdas, sendo que os ângulos podem ser calculados pelas equações 3, 4 e 5 e são função dos ângulos solares de azimute e zênite, com relação ao Concentrador Linear Fresnel. A importância da compreensão dos valores modificados do ângulo de incidência é devida em função de sua influência no rendimento ótico do CLF.

Figura 22 – Ângulos de incidência modificados em função das projeções do ângulo de incidência básico



Fonte: Pigozzo *et. al.* (2018).

$$\theta_T = \tan^{-1}(\tan\theta_z \sin\gamma) \quad (3)$$

$$\theta_L = \tan^{-1}(\tan\theta_z \operatorname{Cos}\gamma) \quad (4)$$

$$\theta_i = \sin^{-1}(\sin\theta_z \operatorname{Cos}\gamma) \quad (5)$$

As indicações das componentes do vetor $\hat{S}$ nos planos transversal e longitudinal relacionadas com o ângulo de incidência foram mostradas através dos vetores $\hat{S}T$ e $\hat{S}_L$, respectivamente. O ângulo de incidência transversal θ_T e o ângulo de incidência longitudinal θ_L são os ângulos entre as componentes transversal e longitudinal do vetor $\hat{S}$ e a linha vertical normal (Z). O ângulo θi é o ângulo entre o vetor $\hat{S}$ e sua componente transversal $\hat{S}T$.

Ainda relativo à eficiência ótica em um CLF, segundo orientação do fabricante de CLF "*SOLATOM*," as curvas desenvolvidas em seus módulos indicam os modificadores dos ângulos de incidência nos planos longitudinais e transversais do ângulo de incidência original (θ). Os ângulos de incidência modificados (*AIM* – eixo vertical) são usadas para estimar o desempenho ótico do CLF. A eficiência ótica é calculada multiplicando-se o desempenho ótico nominal (63,2%) pelo valor do *AIM* transversal ou do *AIM* longitudinal obtido das curvas do gráfico desenvolvido e informado pelo fabricante. Estas curvas foram determinadas através de ferramentas de rastreamento dos raios incidentes. Já segundo Almeida (2013) o rendimento ótico (η_{op}) é a razão entre a potência entregue ao coletor após duas reflexões, sendo que a primeira reflexão é realizada nos espelhos primários do campo solar, influenciada pelo índice de refletividade dos espelhos (ρ = 0,92), essa segunda reflexão ocorre nas paredes refletoras da cavidade, independentemente de sua geometria, sendo parametrizada pelo fator de reflexão da superfície da cavidade (Ƙ = 1). O rendimento ótico é função também do fator de interseção (Γ = 0,97), relação dos raios refletidos e os raios que chegam ao receptor (0,97), da absortividade do receptor (Λ = 0,96) e da transmissividade da cobertura de vidro no concentrador secundário (Tr = 0,90). Contudo, a componente existente no *TRNSYS* relativa ao CLF já contempla os ângulos de incidência modificados de acordo com os parâmetros climáticos de cada região analisada e selecionada nos arquivos do software durante todo o decorrer da simulação. Isso facilita os trabalhos e análises dos resultados.

4.5.6 Rendimento Térmico e perdas térmicas no CLF

O rendimento térmico em um campo solar CLF é função do material e do revestimento do receptor Absorvedor, da relação de concentração do coletor, da temperatura de entrada do fluido térmico, da temperatura ambiente local e da intensidade da radiação solar disponível. É a razão entre o calor captado no coletor e o calor útil utilizado. Para se ter o máximo de aproveitamento da energia térmica captada no CLF, tem-se que levar em conta todos os mecanismos existentes que influenciam na transferência de calor entre o tubo concentrador e o fluido térmico a ser aquecido e transformado em vapor. Esses parâmetros influenciadores

do rendimento térmico dizem a respeito à radiação, condução e convecção nas trocas térmicas e devem ser determinados através do balanço de energia e de massa no volume de controle que passa pelo absorvedor. As perdas térmicas influenciam diretamente no balanço de energia e de massa, essas perdas térmicas ocorrem devido aos fenômenos de transporte de energia e de massa no percorrer do fluido térmico dentro do circuito hidráulico do campo solar, quando ocorrem as respectivas trocas térmicas, podendo ser atenuadas conforme seguem:

- **Condução:** As perdas térmicas por condução podem ser reduzidas com um bom isolamento térmico dos componentes por onde circula o fluido térmico. Vários tipos de isolamento são encontrados comercialmente, tais como lã de vidro, lã de rocha, poliestireno expandido, aglomerado de cortiça, fibra de vido, entre outros;

- **Convecção:** As perdas térmicas por convecção podem ser reduzidas com a redução da circulação, no caso de um campo solar, do ar que circula sobre a superfície do sistema absorvedor. Para isso, basta usar uma cobertura transparente, em plástico, em vidro, quando se tratar de tubos não evacuados, ou com uso de tubos evacuados na construção do conjunto absorvedor;

- **Radiação:** A redução das perdas térmicas por radiação pode ser conseguida com a redução da área da superfície do sistema absorvedor ou, quando possível, o uso de superfície seletiva (tratamento superficial). Deste modo, o uso de superfícies seletivas para a mesma área de absorbância poderá apresentar valores de menor emissividade de radiação.

4.5.7 Projetos desenvolvidos para uso de CLF

Várias são as possibilidades de uso da tecnologia CLF em processos industriais como na produção automotiva em diversos de seus processos, tais como: fundição, tratamento térmico, pintura, entre tantos outros processos dependentes de energia fósseis ou de biomassa, seja para gerar calor ou energia elétrica.

Alguns exemplos de uso de plantas com campo solar CLF para produção de energia são: na Arábia Saudita, terra do petróleo, já há uma grande preocupação em usar energias renováveis, visando o futuro do país e a preocupação com aquecimento global. Em cidades sauditas a média diária da irradiação global atingiu o nível de 6.336 Wh/m²dia em 2018,

enquanto o nível da Irradiação Normal Direta (DNI) da região atingiu 5.366 Wh/m²dia, o que favorece bastante construir campos solares que tem bons rendimentos a partir de DNI de 4.200 Wh/m²dia (Reis; Tiba, 2016). Neste país foi construída um campo solar CLF para suprir parte da demanda de energia na Arábia Saudita, construída na cidade de Riad com capacidade de 100 MW. A planta contribuirá na redução da dependência da Arábia Saudita dos combustíveis fósseis, essa planta utiliza o sal fundido e sódio líquido para fazer comparativo de qual é mais atrativo economicamente como fluido de transferência de calor.

Em Almeria, Espanha foi desenvolvido um pequeno protótipo para desinfecção de água que usa como fonte de calor uma planta CLF. O sistema proposto consiste em um refletor Fresnel de pequena escala, contento um filtro comporto de duas unidades de desinfecção, um trocador de calor, um sistema de ar comprimido e um sistema de controle. O sistema de desinfecção foi estudado sob diferentes condições de operação, tendo uma irradiância solar na superfície horizontal que varia de 325 a 798 W/m² no que corresponde ao meio dia solar, para o solstício de inverno e solstício de verão, respectivamente. A temperatura ambiente variou de 19 a 29 ºC no solstício de verão e variação entre 8 a 16º C no solstício de inverno. O fluido térmico circula com uma taxa de fluxo de 2.200, 2.400, 2.600 e 2.800 dm³/h, com a temperatura da água na saída do tanque de água filtrada que variou de 8, 12, 16 e 20 ºC. O sistema teve seu desempenho estudado em função da temperatura do fluido térmico que circulou no CLF e a temperatura da água na unidade de desinfecção durante o enchimento e esvaziamento dos reservatórios. Ao fim foi pontuada a produtividade diária e acumulada de água limpa processada. Simulações numéricas demostrou os valores da produtividade de água limpa na ordem de 357,14 dm³/m² dia a 100 ºC e 198,41 dm³/m² dia a 100 ºC para o solstício de verão e solstício de inverno, respectivamente, considerando uma taxa de fluxo do fluido térmico de 2.400 dm³/h. Ainda na Espanha, em 2012 entrou em operação um CLF para geração de energia elétrica com as seguintes características: 302.000 m² de área coletora da radiação solar, geração de vapor a 270° C, pressão de operação 5500 kPa com capacidade produtiva de gerar 30 MW elétrico (Industrial Solar GmbH, 2023).

Na Jordânia, mostradas na Figura 23, duas plantas CLF forma colocadas em operação: em 2015 em uma indústria farmacêutica com área coletora de 400 m², produzindo vapor a 200° C, com capacidade de gerar carga térmica de 222 kW_{th} de calor, atendendo os processos de secagem e de autoclave. Outra planta CLF na Jordânia, entrou em operação no ano de 2017 com o objetivo de gerar calor para refrigeração numa indústria de tabaco, tendo 1254 m² de área coletora, produzindo vapor a 225° C a pressão de 2500 kPa com capacidade produtiva de 705 kW térmico para calor e 580 kW térmico para frio.

Figura 23 – Plantas de CLF na Jordânia. (a) Ind. Farmacêutica e (b) Ind. De Tabaco



(a) (b)

Fonte: Adaptado de Industrial Solar GmbH (2023).

Outros projetos desenvolvidos na Espanha, através da empresa *Solatom*, fabricante de concentradores Fresnel no sistema modular, realizou diversos projetos e suas respectivas montagens em diversas localidades a seguir:

Campo solar projetado e construído em 2019 com 16 módulos, mostrado na Figura 24, sendo cada conjunto com ligações em série, formando um campo solar com 04 conjuntos ligados em paralelo. Sistema usado para aquecer água pressurizada a 130°C e armazenada em tanque isolado.

Figura 24 – Planta Fresnel para aquecimento de água. *MAGTEL*



Fonte: Solatom (2019).

Projeto de 2020 para geração de vapor saturado a 600 kPa para a fábrica de detergentes Herma. É o primeiro projeto de vapor solar na região de Extremadura (região autônoma na Espanha, fronteira com Portugal). A geração de vapor é produzida indiretamente com um auxílio de sistema de boiler e caldeira, mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Planta Fresnel para geração de vapor em sistema híbrido – Herma



Fonte: Solatom (2020).

Projeto em 2022 para indústria de alimentos em Valência, Espanha usando óleo como fluido térmico. Este projeto é o primeiro de grande escala pra captar a radiação em um telhado industrial, usando um sistema de trilhos para montar e fixar os módulos solares sobre a edificação industrial, mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Planta Fresnel sobre galpão para processos alimentícios



Fonte: Solatom (2022).

A Figura 27 apresenta um projeto de 2023 para dessalinização da água do mar na Arábia Sadita. Sistema modular montado em 48 horas.

Figura 27 – Planta Fresnel para dessalinização



Fonte: Solatom (2023).

A *Solatom* projetou para a fábrica da Heineken, na cidade de Valência, um CLF para a produção de calor em forma de vapor, com pressão de trabalho de 900 KPa, sem emissões de CO_2, caso fosse utilizada uma fonte de energia fóssil ou de biomassa. Isso indica uma evolução na busca de fontes renováveis de geração de energia em forma de vapor. Esta central solar tem a capacidade de produz uma potência nominal de 4,2 MW térmicos em quase 6.000 m² de campo solar. Nesta planta solar a Heineken poderá produzir cerveja utilizando energia renovável através de uma usina solar fornecedora de vapor para seus processos cervejeiros que demandam energia térmica, gerando créditos de carbono na produção da Heineken, conforme mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Planta Fresnel em fábrica de cerveja HEINEKEN



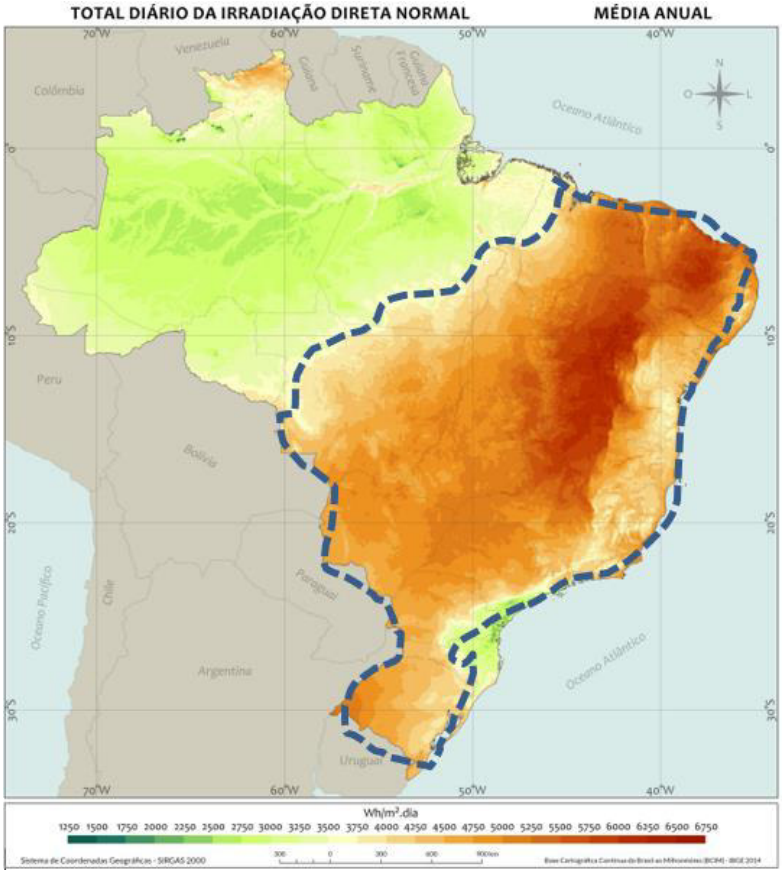
Fonte: Solatom (2023).

Quando uma empresa de grande porte como a Heineken dar o exemplo positivo em busca de novas e inovadoras soluções, além de econômicas, mostra que há uma evolução natural para que outras procurar a fazer uma transição para fontes de energia renováveis em seus processos industriais.

5 METODOLOGIA

Primeiramente é necessário selecionar o local para construir um campo solar CLF, assim sendo, dois parâmetros são essenciais: ter a disponibilidade suficiente de radiação solar e, necessariamente, selecionar localidades próximas de centros industriais ou próximas de indústrias agrícolas, atendento o objetivo deste trabalho. Para se ter uma visão mais clara das localidades disponíveis dentro do território brasileiro, foi mostrado na Figura 29 as regiões mais adequadas e viáveis do ponto de vista da radiação solar para se instalar um campo solar.

Figura 29 – Dados de DNI no Brasil



Fonte: Adaptado Reis; Tiba (2016).

Conforme valores de DNI indicados na Figura 29, a partir de 4.200 Wh/m²dia de radiação local disponível é considerado como favorável para uso de campo de concentração solar. Isso significa que uma vasta região do Brasil, desde a região Sul, passando pelo Sudeste, Centro Oeste, uma pequena parte da região Norte e pricipalmente, toda a região Nordeste do país,

tendo acima de 4.500 kWh/m²dia de DNI. Isso mostrou que o Brasil tem potencial muito grande para desenvolver a tecnologia de concentração solar.

5.1 Determinação da energia absorvida teórica para produção de vapor estimada

Com referências de Tabelas termodinâmicas segundo Çengel e Boles (2013) precisa-se para a produção de 300 kg/h de vapor para atender os processos com demanda de energia térmica conforme indicados na Tabela 1 e na Tabela 2. A entalpia necessária para gerar vapor é de 2.768,3 kJ/kg ou 664 kcal/kg, para se produzir 1,0 kg/h de vapor saturado na saída do CLF, com temperatura de saturação de 170,41° C e submetida à pressão de 800 kPa, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros termodinâmicos do vapor saturado

Energia interna (kJ/kg)			**Entalpia (kJ/kg)**			**Entropia (kJ/kg)**			**Volume específico (m³/kg)**	
líq. Sat	**Evap. (ι,v)**	**Vap. Sat**	**líq. Sat**	**Evap. (ι,v)**	**Vap. Sat**	**líq. Sat**	**Evap. (ι,v)**	**Vap. Sat**	**liq. Sat**	**Vap. Sat**
719,97	**1856,1**	**2576**	**720,87**	**2047,5**	**2768,3**	**2,0457**	**4,616**	**6,6616**	**0,00112**	**0,24035**

Fonte: Adaptado de Çengel e Boles (2013).

A energia solar absorvida (E_{abs}) a ser absorvida, embora seja um parâmetro previamente conhecido (261 kW), em função dos módulos a serem utilizados, pode também ser determinada através do rendimento ótico, dado pela Equação 6. Tendo a potência estimada em função da vazão de vapor demandada calcula-se a área total do campo solar (A_{cs}) através da Equação 7.

$$\eta_{ot} = \rho\, T\, \Lambda\, \text{Ƙ}\, \Gamma \tag{6}$$

$$E_{abs} = A_{cs}\, DNI\, \eta_{ot} \tag{7}$$

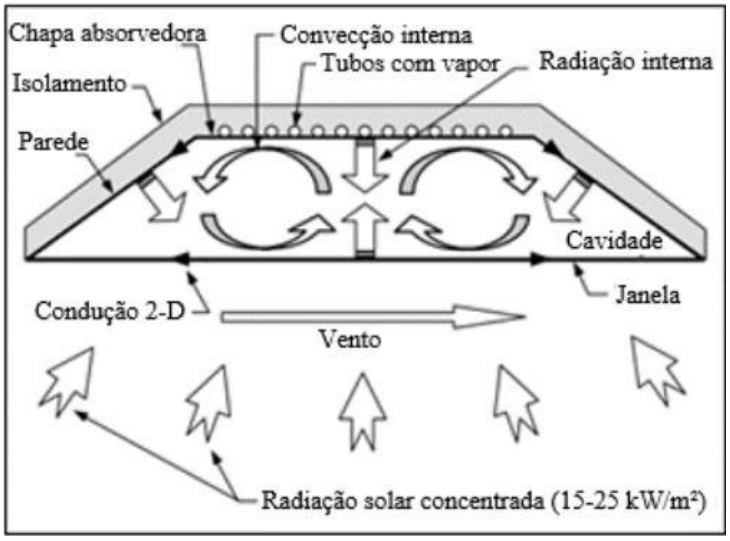
O campo solar CLF contou com uma geradora de vapor auxiliar para manter a demanda de vapor nos processos. Assim sendo, com conhecimento da média da radiação disponível

nas localidades que foram simuladas na plataforma *TRNSYS* e da energia necessária para se produzir vapor, pode-se dimensionar um campo solar Fresnel para produzir vapor a partir da uma vazão, também determinada como premissa, na ordem de 300 kg/h para ser transformada em energia térmica na forma de vapor saturado.

5.2 Modelo térmico e balanço de energia

Na estrutura de absorvedor do tipo de calha trapezoidal as perdas térmicas acontecem por efeitos da condução na estrutura da calha, da radiação incidente no sistema absorvedor e da convecção relativa ao ambiente e do movimento do fluido térmico (volume de controle) dentro do tubo absorvedor. Segundo Zarza (2003), as perdas por condução, para este caso são consideradas desprezíveis. A Figura 30 mostrou o esquema de um sistema absorvedor do tipo trapezoidal que indicam os efeitos da transferência de calor dentro e fora da cavidade onde estão inseridos o conjunto de tubos múltiplos.

Figura 30 – Efeitos da transferência de calor na calha trapezoidal



Fonte: Pigozzo *et al.* (2018); Reynolds *et al.* (2004).

O modelo térmico do CLF determinou os parâmetros como potência, vazão e temperatura do sistema. Os principais parâmetros são a temperatura do fluido térmico (água) e a potência absorvida pelo fluido para diferentes vazões mássicas. A Figura 35 e a Figura 36 apresentaram os fluxos térmicos considerados no modelo, para o tubo absorvedor e para o concentrador secundário, respectivamente.

A energia absorvida pela água pressurizada (E_{abs}) pode ser calculado para as duas fases de operação do sistema, sendo a primeira fase que consiste no aumento da temperatura, e consequentemente da pressão, do volume de água do reservatório e a segunda consiste na produção direta de vapor saturado. No decorrer da elevação da temperatura, a água circula o sistema hidráulico em um circuito fechado e a potência absorvida da radiação solar, segundo a Equação 8.

$$E_{abs} = \dot{M}_{ag}\, Cp_{ag}\, (T_{sai,ag} - T_{ent,ag}) \tag{8}$$

A partir disso, pode ser realizado o balanço de energia para todos os componentes do sistema absorvedor com o uso do coeficiente de perda térmica (U_{pt}) sendo o fluxo de energia e o rendimento térmico definidos através das Equações 9, 10, 11 e 12.

$$E_{abs} = DNI\, A_{cs}\, \eta_{ot} = \dot{M}_{ag} Cp_{ag} (T_{sai,ag} - T_{ent,ag}) \tag{9}$$

$$E_{pt} = A_{ab}\, U_{pt}\, (T_{ab} - T_{aa}) \tag{10}$$

$$E_{ut} = m_v \left\{H_v - \left[H_l - \left(C_{pa}\, T_{aa}\right)\right]\right\} + E_{pt} \tag{11}$$

$$\eta_G = \frac{E_{ut}}{E_{abs}} \tag{12}$$

Sendo: E_{abs} – Energia absorvido pelo campo solar, E_{pe} – Energia pedida, E_{ut} - Energia útil, η_G - Rendimento global, m_v, H_v - são respectivamente massa e entalpia do vapor, H_l - Entalpia do líquido saturado, C_{pa} - Calor específico da água (4,186 kJ/kg) e T_{aa} - Temperatura da água de alimentação.

Segundo Beltagy *et. al.* (2017), quando se atinge a temperatura de saturação do vapor, no ponto ajustado no sistema, inicia-se então a geração de vapor no CLF, podendo calcular a energia absorvida através da Equação 13.

$$E_{abs} = \dot{m}_{vapor}\, \Delta H_{vaporização} + \dot{M}_{ag,rep}\, (T_{vaporização}\, Cp_{vaporização} - T_{ag,rep,ent}\, Cp_{T,ag,rep,ent}) \tag{13}$$

Sendo: $\dot{m}_{vapor}$ a vazão mássica de vapor do sistema, $\Delta H_{vaporrização}$ a variação de entalpia de vaporização, $\dot{M}_{ag,rep}$ a vazão mássica de água de reposição do sistema,

$T_{vaporização}$ a temperatura do vapor, $Cp_{T,vaporização}$ o calor específico da água na temperatura de vaporização, $T_{ag,rep,ent}$ a temperatura da água de reposição e $Cp_{T,ag,rep}$ o calor específico da água de reposição.

No que refere ao sistema com o tubo absorvedor ou sistema absorvedor é feito um balanço de energia que é válido para todo o processo de operação do sistema, devido ao "ganho energético" pelo uso de uma proteção de vidro que enclausura o sistema de tubo absorvedor (Almeida, 2013) e dado pela Equação 14 para se ter a energia efetiva.

$$E_{ef} = E_{abs} - E_{pt} \tag{14}$$

Segundo Pino *et al.* (2013) o calor perdido é calculado com base nas perdas por convecção para o ambiente, causadas também pela irradiação entre o tubo absorvedor e o concentrador secundário e entre o tubo absorvedor e o ambiente, conforme mostra a Equação 15.

$$E_{pt,cs} = E_{conv,amb} + E_{rad,tb,cs} + E_{conv,vd,amb} \tag{15}$$

Sendo: $E_{conv,amb}$ a energia perdida para o ambiente por convecção, $E_{trad,tb,cs}$ as perdas por radiação entre o tubo receptor e o concentrador secundário, $E_{tb,amb}$ a perda entre o tubo receptor e o ambiente.

Na estrutura do concentrador secundário, as perdas térmicas também devem ser consideradas. O balanço de calor entre a superfície interna e externa do concentrador são representados pelas Equações, (Pino *et al.,* 2013). O fluxo de calor radiante entre o tubo absorvedor e a face interna do concentrador secundário é dado pela Equação 16.

$$E_{rad,tb,cs} = \frac{\sigma(T_{tb}^4 - T_{int,cs}^4)}{\frac{1-\varepsilon_{tb}}{A_{tb}\varepsilon_{tb}} + \frac{2}{A_{tb}} + \frac{1-\varepsilon_{int,cs}}{A_{int,cs}\varepsilon_{int,cs}}} \tag{16}$$

Já o fluxo de calor radiante entre a proteção de vidro plano que faz o fechamento do concentrador secundário a o ambiente externo é dado pela Equação 17.

$$E_{rad,vd,amb} = \frac{\sigma(T_{vd}^4 - T_{amb}^4)}{\frac{1-\varepsilon_{vd}}{A_{vd}\varepsilon_{vd}} + \frac{2}{A_{vd}}} \tag{17}$$

Sendo: $E_{rad,vd,amb}$ a perda de energia radiante entre a proteção de vidro e o ambiente interno do concentrador secundário, σ é a constante de Stefan Boltzmann (5,67 x 10^{-8} W/m²K^4), T_{tb}^4 é a temperatura do tubo absorvedor, $T_{int,cs}^4$ é a temperatura interna do concentrador secundário, ε_{tb} é a emissividade do tubo absorvedor, A_{tb} é a área superficial do tubo, $A_{int,cs}$ é a área superficial interna do concentrador secundário, $\varepsilon_{int,cs}$ é a emissividade da área interna do concentrador secundário, T_{vd}^4 é a temperatura da proteção de vidro, T_{amb}^4 é a temperatura ambiente, A_{vd} é a área da proteção de vidro, ε_{vd} é a emissividade da proteção de vidro.

5.3 Simulação do CLF com o software *TRNSYS-18*

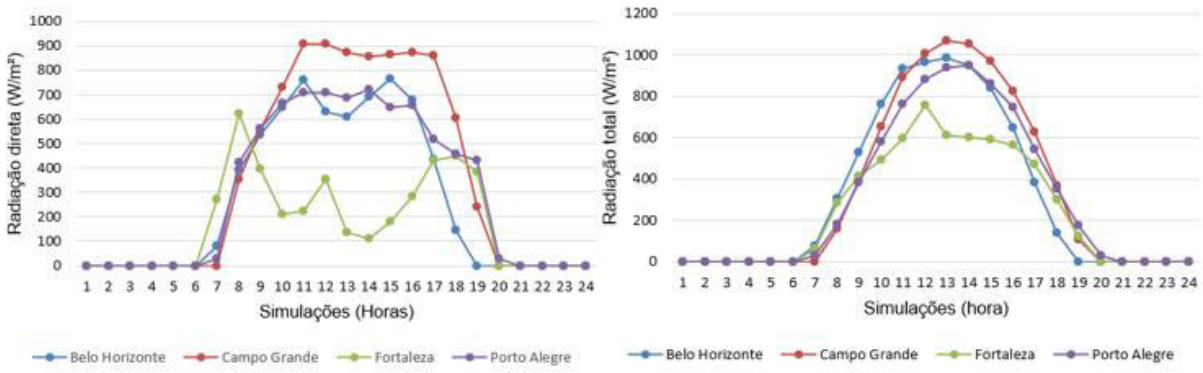
As premissas para a simulação do CLF desenvolvido para este trabalho foram baseadas em módulos do fabricante *Solatom* com a seguinte configuração:

- Área total por módulo é 26,4 m²;
- Potência por módulo 14,5 kW ou 549 W/m²;
- Dimensões por módulo L x W x f (6 x 6 x 3,5) m;
- Potência total requerida de 261 kW;
- 10 fileiras de espelhos refletores;
- 18 módulos Fresnel com área total de 475,2 m²;
- Vazão de vapor até 300 kg/h;
- Pressão de trabalho de 800 kPa;
- Temperatura de saturação de 170,41° C;
- Água de alimentação a 50° C com reaproveitamento de calor residual;
- Sistema de apoio auxiliar com caldeira com gás liquefeito de petróleo (GLP).

O modelo simulado usou a plataforma *TRNSYS–18* que permite fazer análises de sistemas transientes e que é bastante usado nos sistemas que trabalham com energia solar. Os dados usados e fornecidos tiveram a fonte do banco de dados do *Meteonorm* gerados pela própria plataforma, considerando as cidades de Belo Horizonte – MG, Campo Grande – MS, Fortaleza – CE e Porto Alegre – RS, como representantes das regiões brasileiras do Sudeste, Centro Oeste, Nordeste e Sul, respectivamente, pelo fato de estas regiões terem alto grau de desenvolvimento industrial com um bom potencial de radiação direta (DNI), superior a 4.200

kWh/m²dia, conforme mostrado no Gráfico 2, permitindo analisar os respectivos desempenhos do CLF em cada uma destas regiões estudadas.

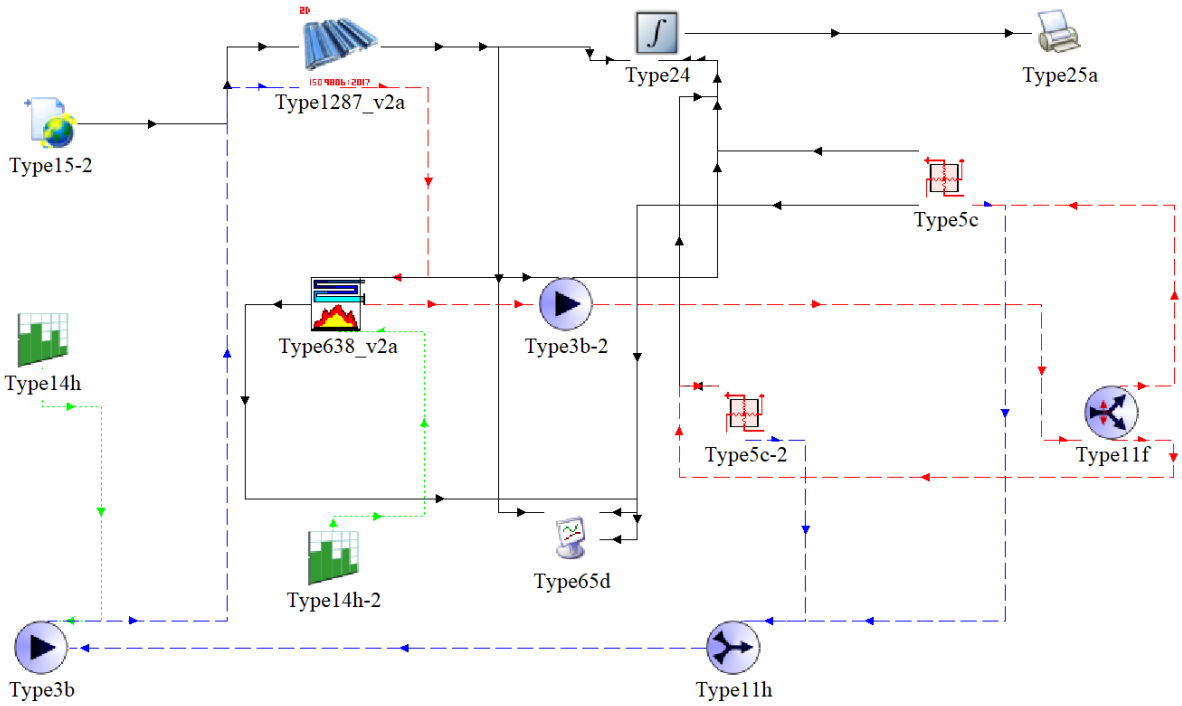
Gráfico 2 – Radiação direta no plano do coletor e total no plano horizontal



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Posteriormente, é conveniente fazer uma análise financeira e verificar a viabilidade também econômica para implementação de sistema de geração direta de vapor com o uso de um campo solar Fresnel como opção e complemento de fornecimento de energia térmica para processos fabris nas distintas regiões conforme mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Modelo geral da simulação para produção direta de vapor no *TRNSYS-18*



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.4 Validação do modelo desenvolvido no *TRNSYS-18*

Para validar o modelo foi feito um comparativo com o protótipo desenvolvido no laboratório LEPTEN, da Universidade de Santa Catarina (Pigozzo *et al.,* 2018). No comparativo foi considerado os parâmetros do protótipo do LEPTEN que foram inseridos no *TRNSYS* para uma simulação do CLF, permitindo verificar as respectivas saídas de calor (Q) e de temperatura (T) de ambos os campos solares. As diferenças existentes entre os campos solares foram nas respectivas áreas totais de abertura de espelhos em cada planta Fresnel, sendo 54 m² do protótipo LEPTEN e 475,2 m² do modelo simulado. No modelo foram inseridos os dados do protótipo do LEPTEN – SC, considerando a pressão e temperatura conforme a referência citada. Para efeito comparativo foi mostrada uma relação de valores coerentes ao se fazer a simulação no *TRNSYS-18* para um mesmo período, próximo ao do equinócio de primavera entre os dias 15 e 25 de setembro. No comparativo foram usados os dados climáticos da cidade de Belo Horizonte, localidade com DNI médio de 5,5 kWh/m²dia e de Florianópolis – SC que tem DNI médio de 4,26 kWh/m²dia, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros do protótipo LEPTEN – SC inseridos no modelo

eter Input Output Comment

		Name	Value	Unit
1		Steam Inlet Temperature	220.0	C
2		Steam Inlet Flowrate	300.0	kg/hr
3		Steam Inlet Pressure	2320.0	kPa
4		Steam Inlet Enthalpy	2700.	kJ/kg
5		Input Control Signal	0.0	-
6		Boiler Efficiency	0.75	-
7		Combustion Efficiency	0.90	-
8		Desired Outlet Enthalpy	2801	kJ/kg

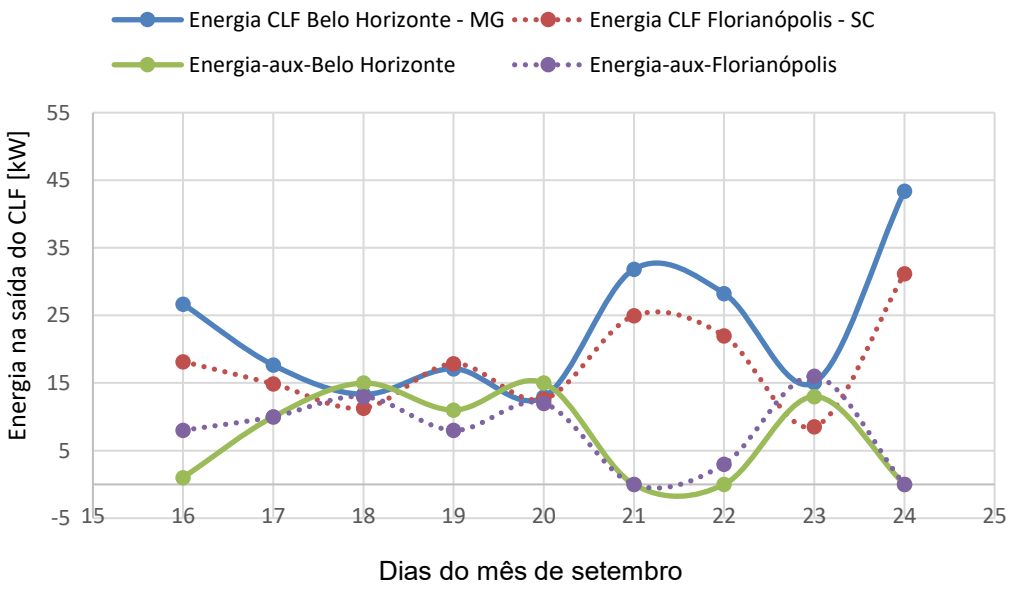
ler Input Output External Files Comment

		Name	Value	Unit
1		Collector Module Area	54	m^2
2		Total Number of Modules	1	-
3		Number of Modules in Series	1	-
4		Fluid Specific Heat	4.19	kJ/kg.K
5		Logical Unit for IAM Data	36	-
6		Number of Transverse Angles	8	-
7		Number of Longitudinal Angles	7	-
8		IAM for Diffuse Radiation	0.12	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a inserção dos dados pode ser realizadas as simulações do modelo com os parâmetros do protótipo da Universidade de Santa Catarina (UFSC) no modelo deste trabalho, considerando duas localidades com DNI distintas, Belo Horizonte - MG e Florianópolis – SC. Ao final foi mostrada a variação da energia (E) entregue pelo Concentrador Linear Fresnel para a geração direta de vapor para ambas as situações, além da energia requerida pelo sistema auxiliar, conforme indicado no Gráfico 3.

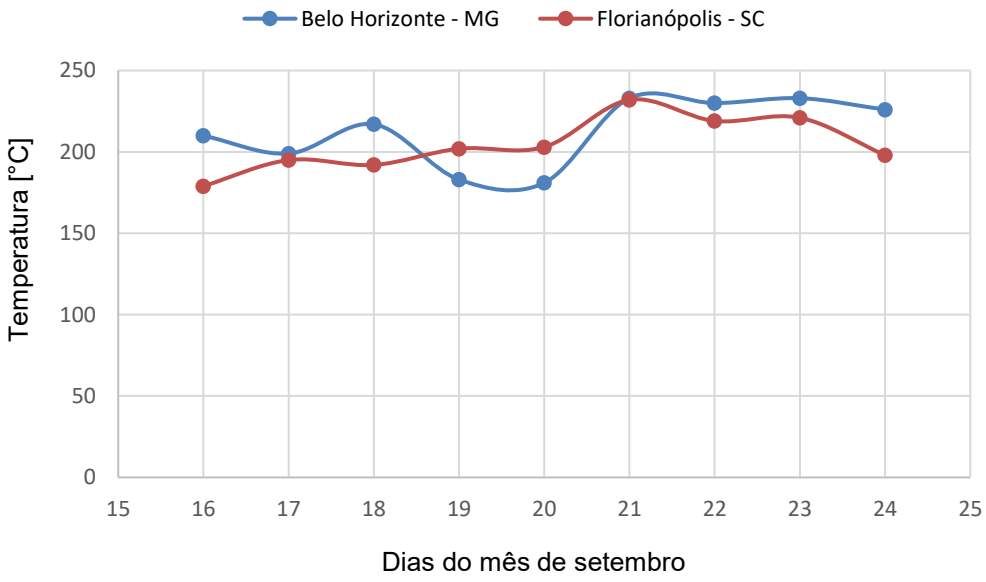
Gráfico 3 – Comparativo de energia produzida no CLF e da energia complementar do projeto modelado com os dados do LEPTEN – SC



Fonte: Elaborado pelo Autor.

De maneira análoga foi realizado um comparativo dos perfis das temperaturas na saída do CLF modelado com os dados de referência (Pigozzo *et al.,* 2018) para ambas as localidades. As diferenças de energia disponível no campo solar são proporcionais das diferenças de DNI disponível para cada cidade do comparativo, pois, indicam perfis similares das curvas de energias, tanto da energia térmica gerada no CLF quanto da energia requerida pelo sistema (caldeira) auxiliar, conforme indicado no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Comparativo das temperaturas na saída do CLF



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em um CLF, em tese, as temperaturas de saída em um CLF podem atingir patamares entre a temperatura ambiente e chegar até 400° C. A temperatura alvo deste trabalho a ser atingida, para gerar vapor saturado, é de 170,41° C. Entretanto, para manter as temperaturas em níveis com o mínimo de variações, mantendo os processos operacionais constantes, foi inserido uma caldeira para gerar vapor nos períodos de baixa irradiação ou nenhuma irradiação, além disso, a caldeira funciona com um tanque acumulador de vapor e energia. O fluido térmico circula o tempo todo pelo circuito hidráulico do sistema, pois, após a passagem pelos processos o fluido retorna ao CLF e em seguida pela caldeira auxiliar que se conecta em série com o CLF. A caldeira, por sua vez, somente entra em operação se o fluido não conter toda a carga térmica necessária para gerar vapor através do CLF, não ocorrendo perda de tempo quando for requerida para entrar em operação e complementar a carga térmica demandada. A caldeira é controlada de acordo com a entalpia ajustada no sistema na entrada dela. Se a entalpia estiver abaixo do valor ajustado a cadeira entrar em operação

automaticamente e mantém na sua saída a entalpia necessária e demandada pelo sistema de geração de vapor. Desta forma, foi garantida uma faixa constante de temperatura na entrada dos processos que necessitam de energia térmica. No esquema apresentado estão indicados alguns dos componentes utilizados na simulação do CLF, tendo esse a configuração e dados de entrada mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Configuração básica do campo solar Fresnel com dados de entrada

Parameter | Input | Output | External Files | Comment

	Name	Value	Unit
1	Collector Module Area	**26.4**	m^2
2	Total Number of Modules	**18**	-
3	Number of Modules in Series	**6**	-
4	Fluid Specific Heat	4.182	kJ/kg.K
5	Logical Unit for IAM Data	**36**	-
6	Number of Transverse Angles	8	-
7	Number of Longitudinal Angles	7	-
8	IAM for Diffuse Radiation	0.12	-

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A caldeira geradora de vapor, que funcionou como sistema auxiliar na falta de radiação para gerar energia térmica tem seus parâmetros e dados de entrada apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Configuração da caldeira auxiliar e seus respectivos dados de entrada

Parameter | Input | Output | Comment

	Name	Value	Unit
1	Steam Inlet Temperature	171.0	C
2	Steam Inlet Flowrate	300.0	kg/hr
3	Steam Inlet Pressure	800.0	kPa
4	Steam Inlet Enthalpy	2500.	kJ/kg
5	Input Control Signal	0.0	-
6	Boiler Efficiency	0.75	-
7	Combustion Efficiency	0.90	-
8	Desired Outlet Enthalpy	2678.0	kJ/kg

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os trocadores de calor, na simulação, representam os processos fabris, pontos em que a energia térmica gerada pelo CLF e ou pela fonte auxiliar, será disponibilizada para a operação de transferência de calor na produção. Eles foram configurados conforme mostrado na Tabela 6. No entanto, os trocadores de calor estão ligados em fontes distintas de energia para se poder realizar comparativos entre as temperaturas geradas no sistema pelo CLF e temperatura da fonte auxiliar de geração de vapor, mostrando seus respectivos comportamentos.

Tabela 6 – Configuração dos trocadores de calor (processos) e respectivos dados de entrada

er | Input | Output | Comment

		Name	Value	Unit
1		Source side inlet temperature	171	C
2		Source side flow rate	150.0	kg/hr
3		Load side inlet temperature	150.0	C
4		Load side flow rate	150.0	kg/hr
5		Overall heat transfer coefficient of exchanger	10.0	kJ/hr.K

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Todos os componentes do campo solar estão descritos com seus respectivos resumos de operação na sequência e relacionados na sequência.



1- *Type1287_v2a* representa o campo solar Fresnel (CLF), o conjunto formado pela superfície refletora (espelhos) e o sistema absorvedor (tubos);



2- *Type5c* representa o trocador de calor (processo 1);



3- *Type5c-2* representa o trocador de calor (processo 2);



4- Type24 *Type24* resolve a integração dos dados de entrada selecionados e que serão impressos;



5- Type65d *Type65d* é a saída e o comando para gerar gráficos das variáveis analisadas;



6- Type25a *Type25a* foi usada para imprimir as variáveis selecionadas para análises de resultados;



7- Type11f *Type11f* é selecionadora de direção do fluxo do sistema. Se a temperatura estiver dentro do parâmetro regulado, o fluxo segue para os processos, representados aqui pelos trocadores de calor, componentes usuários da energia térmica;



8- Type11h *Type11h* funciona como uma conexão “T”, sendo utilizada para o direcionamento do fluido térmico, independente do caminho percorrido nas fases anteriores, para o ponto inicial de volta ao campo solar;



9- Type3b *Type3b* é responsável pela circulação do fluído térmico de circulação no Concentrador Linear Fresnel e pressurização do sistema;



10- Type3b-2 *Type3b-2* representa a bomba que circula o fluido térmico, após a caldeira auxiliar para os trocadores de calor (processos térmicos);



11- Type14h *Type14h* controla o fluxo direcionado pela bomba para o CLF durante a ocorrência da irradiação. Essa bomba mantém o sistema pressurizado;



12- Type14h-2 *Type14h-2* controla o fluxo após saída da caldeira auxiliar, direcionando o fluido térmico para os trocadores, equipamentos usuários do vapor gerado no sistema;



13- Type15-2 *Type15-2* foi utilizada para fazer a leitura de dados climatológicos de radiação e temperatura ambiente do "*Meteonorm*" para as cidades selecionadas em cada região de interesse;



14- Type638_v2a *Type638_v2a* representa a caldeira auxiliar para gerar vapor em períodos de baixa irradiação ou então nenhuma para suprir o sistema e a demanda térmica, funciona também como um tanque acumulador para armazenamento de vapor, mantendo o sistema em operação.

Após a organização do modelo e de sua validação foi possível desenvolver as simulações com as cidades selecionadas. Nas simulações foram considerados períodos de cinco dias consecutivos, permitindo uma análise de período sequencial das simulações com variação a cada hora. O primeiro período simulado foi entre os dias 10 e 15 de fevereiro, representando o verão, o segundo período simulado foi entre os dias 10 e 15 de maio, representando o outono e, na sequência, as simulações ocorreram entre os dias 25 e 30 de agosto e de novembro, representando as estações do inverno e da primavera, respectivamente. Os parâmetros para as simulações estão relacionados na sequência:

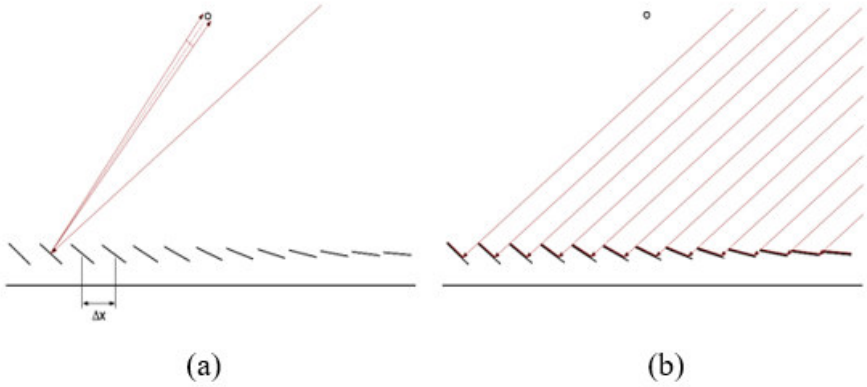
1. DNI em Belo Horizonte 5,50 kWh/m²dia;
2. DNI em Campo Grande 5,40 kWh/m²dia;
3. DNI em Fortaleza 5,80 kWh/m²dia;
4. DNI em Porto Alegre 4,90 kWh/m²dia;
5. Área de espelhos do CLF de 475,20 m²;
6. 18 módulos para formar o campo solar;
7. Três linhas em paralelo com seis módulos cada linha;
8. Pressão de trabalho de 800 kPa;
9. Temperatura de saturação de 170,41° C;
10. Vazão de fluido térmico até 300 kg/h;

Em seguida das simulações foram feitos os cálculos teóricos para o desenvolvimento e determinação dos valores dimensionais do campo solar com um CLF e poder comparar com o modelo do projeto no software *TRNSYS*.

5.5 Dimensionamento numérico do Campo Solar Fresnel

É importante observar a geometria dos espelhos primários como também as características construtivas do sistema absorvedor. Quando o seu dimensionamento for inadequado induzirá ao sistema CLF perdas óticas e térmicas, levando a baixos desempenhos. Para ser mais assertivo possível, se faz necessário reduzir ao máximo os erros de precisão ótica dos raios refletidos da área coletora para o sistema absorvedor, evitando o sombreamento de um espelho em relação aos espelhos adjacentes, por esses estarem em linhas lado a lado, além do sombreamento provocado pelo sistema absorvedor, pois, esse é instalado logo acima dos espelhos refletores, conforme mostrado na Figura 32, atendendo aos parâmetros de reflexão dos espelhos primários sobre suas respectivas posições (Q_n) no campo solar, da inclinação (θ_n) relativa de cada reflexão dos raios e do distanciamento (S_n) entre as linhas de espelhos adjacentes.

Figura 32 – Esquema de espaçamento entre espelhos. Espaçamento adequado (a) e com sombreamento (b)

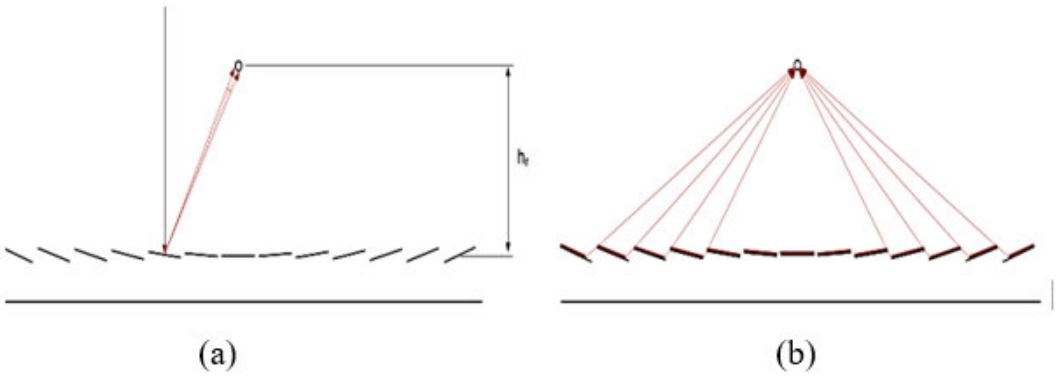


Fonte: Adaptado de Almeida (2013).

O parâmetro fator de concentração terá influência direta na determinação da altura do foco (f) e no rendimento termodinâmico (η_{ter}) do campo solar. No que se refere à altura do foco, quanto este tem altura acima da altura adequada, provoca erro da concentração do CLF, ou seja, erro na relação área que reflete os raios com a área do receptor dos raios. Na situação

contrária, quanto a altura focal é menor que a adequada, ocorrerá o bloqueio das reflexões das linhas de espelhos mais afastadas em relação da linha do foco, conforme mostrado na Figura 33.

Figura 33 – Esquema de erro de foco por altura excessiva (a) e com foco adequado (b)



Fonte: Adaptado Almeida (2013).

5.6 Determinação da distância entre espelhos e da altura do receptor

Outros parâmetros importantes a serem observados na determinação da distância entre os espelhos refletores (S_n) e a altura do receptor (f) são: a direção para segmento aparente do Sol deve ser de leste a oeste, os espelhos precisam ter bom índice de reflexão, a radiação solar incidente deve ser Normal a superfície terrestre conforme Singh, Sarviya e Bhagoria (2010), tendo todos os espelhos as mesmas dimensões. Foram considerados espelhos do tipo plano, conforme relacionados pelas Equações 18, 19, 20, 21 e 22 e mostrado na Figura 34.

$$\theta_n = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left\{\left[\frac{Q_n + \left(\frac{W}{2}\right)\cos\theta_{n-1}}{f - \left(\frac{W}{2}\right)\sin\theta_{n-1}}\right]\right\} \quad (18)$$

$$S_n = W\sin\theta_{n-1}\tan(2\theta_n + \xi_0) \quad (19)$$

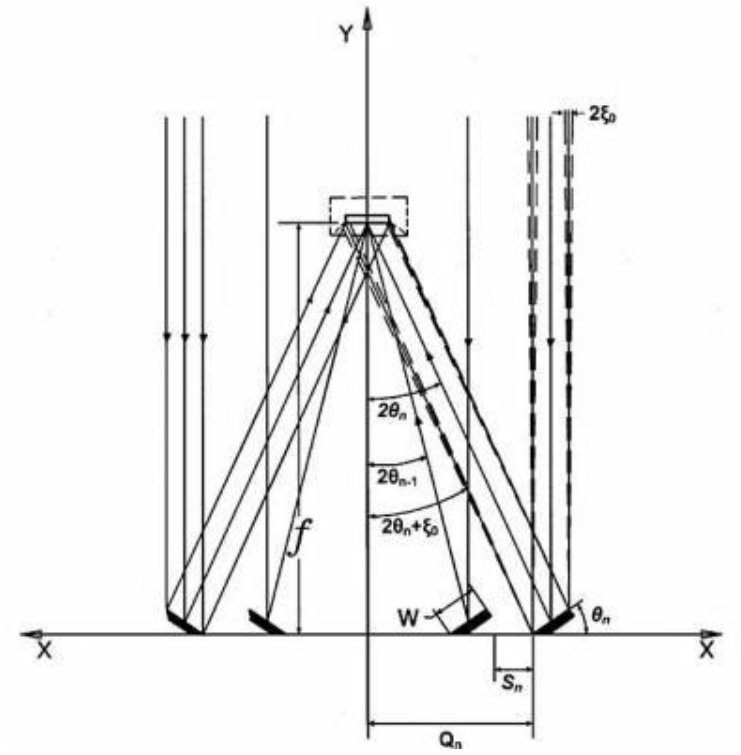
$$Q_n = Q_{n-1} + W\cos\theta_{n-1} + S_n \quad (20)$$

$$C = \frac{Sin\ \theta n}{\pi \times Sin\ \xi_0} \tag{21}$$

$$f = \frac{W_{cs}/2}{4 \times Tan\ (\frac{\theta n}{2})} \tag{22}$$

Sendo: θ_n - Ângulo formado entre altura do foco e a linha de reflexão dos raios em cada espelho; ξ_0 - Ângulo de aceitação da parábola imaginária em relação a inclinação dos espelhos as suas Normais na extremidade horizontal (16' ou 0,2667°); *W* – Largura individual de cada espelho, W_{cs} - Largura total do campo solar; f - Altura do tubo em relação ao plano do campo solar os parâmetros iniciais $\theta_0 = 0$ (ângulo de incidência do raio refletido), $S_1 = 0$ (distância entre as extremidades de espelhos adjacentes), $Q_0 = -\frac{W}{2} e\ Q_1 = \frac{W}{2}$ ($Q_0\ e\ Q_1$ são as metades do espelho central, logo baixo da linha do concentrador), o índice n é o número (1,2,3...) de cada espelho até o enésimo espelho de cada lado da linha do concentrador.

Figura 34 – Geometria das reflexões solares no CLF

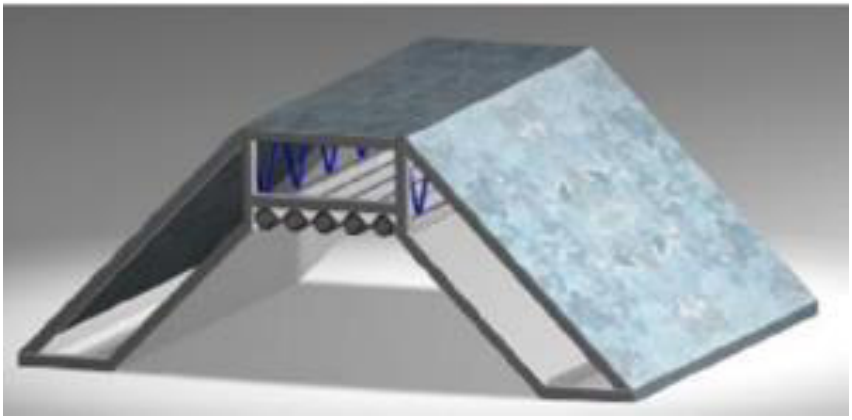


Fonte: Singh; Sarviya; Bhagoria (2010).

5.7 Determinação do concentrador absorvedor

Tendo a potência total no campo solar necessária para geração direta de vapor, pode a partir disso determinada a área total dos espelhos refletores e do concentrador Absorvedor, sendo esse parâmetro definido com uso de tubos múltiplos. A escolha se deveu do fato de que dividindo a vazão de água entre 04 tubos, com a pressão de 800 kPa, possibilitou uma velocidade baixa, o que é desejado nos fluxos de vapor, além de proporcionar mais tempo de exposição do fluido térmico à irradiação durante sua passagem pelo absorvedor. O sistema concentrador será montado com tubos de aço carbono com diâmetro de 1” (ϕ interno 25,40 mm e ϕ externo 26,60 mm), segundo a Norma DIN 2448. Isso se deve pelo aço carbono ser um material comercial bastante utilizado e também ser mais acessível para compra. Será montado em um sistema com refletor secundário do tipo trapezoidal com quatro tubos em paralelo, totalizando uma largura de 106,40 mm. A tubulação do absorvedor foi dimensionada com os parâmetros de velocidade econômica para condução de vapor, sendo menor que 35 m/s, sendo 25 m/s considerada uma velocidade que atenda a maioria dos casos de consumo de vapor na indústria (Bizzo, 2018). Então, foi adotada e arbitrada uma velocidade de segurança de 15 m/s, para trechos curtos. Isso reduz os impactos gerados pela velocidade e a turbulência, considerando uma distância máxima de até 200 m a ser percorrida pelo vapor, entre seu ponto de saída do tanque de armazenamento e o ponto de consumo. Para o dimensionamento do diâmetro da tubulação foram usadas as Equações 23 e 24. A Figura 35 mostra um esquema do suporte dos tubos absorvedores.

Figura 35 – Suporte de concentrador secundário



Fonte: Pigozzo *et. al.* (2018).

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi}\frac{m_v\, v}{3600\, V}} \tag{23}$$

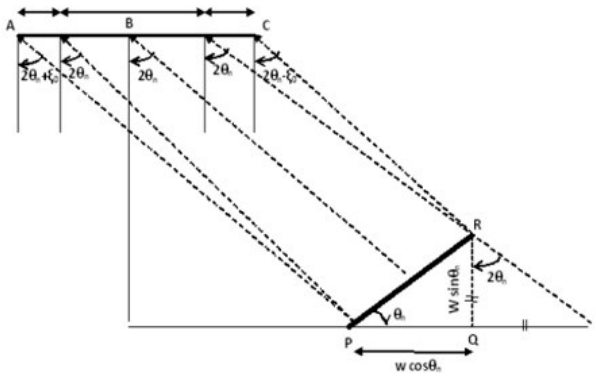
$$\Delta_p = \frac{\mu\, l\, v^2}{2d\, V} \tag{24}$$

Sendo: m_v - Vazão do vapor (kg/h); l - Comprimento da tubulação (m); d - Diâmetro interno do tubo (m); V - Velocidade do vapor (m/s); Δ_p- Perda de pressão (kPa); μ- Coeficiente do atrito; v - Volume específico (m³/kg).

5.8 Fator (Taxa) de Concentração (C) no CLF

Segundo Souza e Fraidenraich (2020), a concentração em um CLF varia entre 10 e 50, sendo 50 o valor máximo recomendado, o que indica que o absorvedor tem área total mínima de 2% em relação à área total coletora dos espelhos. O fator de concentração no CLF é o somatório da contribuição de todos os espelhos primários do campo solar Fresnel (Singh; Sarviya; Bhagoria, 2010). Essa distribuição da taxa de concentração no elemento absorvedor é dada pelas Equações 25, 26, 27, 28 e 29 e mostrado no esquema da Figura 36.

Figura 36 – Modelo de reflexão dos espelhos primários nos tubos múltiplos do concentrador secundário



Fonte: Adaptado de Cruz (2012).

$$C = \sum_{n=1}^{n=m} Cl_n \tag{25}$$

$$Cl_n = \frac{W\ \cos\theta_n}{(U_n D_n I_n)} \tag{26}$$

$$U_n = \left[\left(\frac{f - W\sin\theta_n}{\cos\ (2\theta_n - \xi_0)}\right)\sec 2\theta\ \sin\xi_0\right] \tag{27}$$

$$D_n = (W\cos\theta_n \sec 2\theta_n) \tag{28}$$

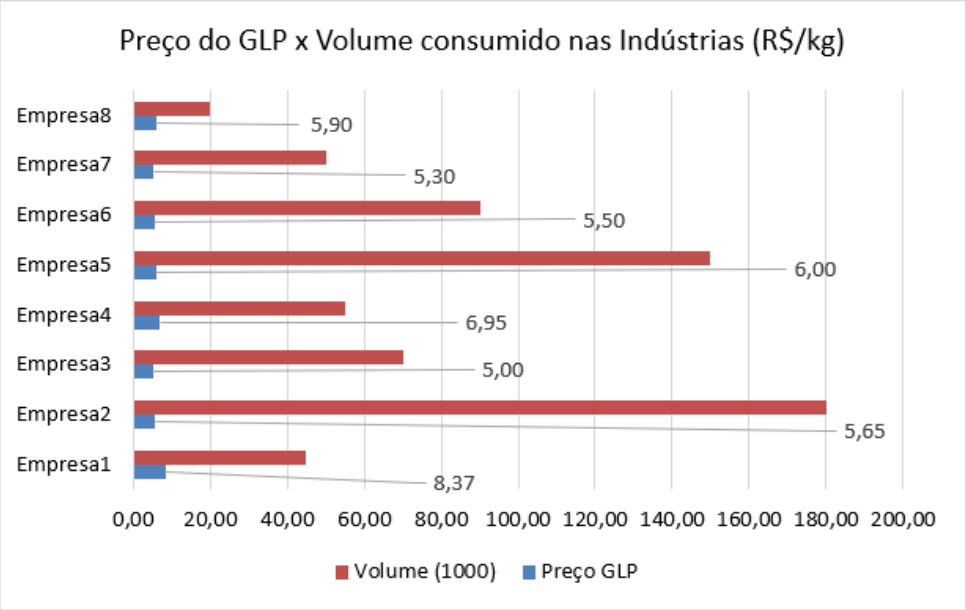
$$I_n = \left[\left(\frac{f\sec 2\theta\ \sin\xi_0}{\cos(\theta_0 + \xi_0)}\right)\sec 2\theta\ \sin\xi_0\right] \tag{29}$$

Sendo: m- Total de espelhos primários, Cl_n – Concentração individual em função da irradiação sobre cada espelho, U_n, D_n, I_n – Porções da largura dos raios refletidos no Absorvedor.

5.9 Custos de produção de vapor em caldeiras

Em pesquisa realizada em campo em julho de 2023, com alguns consumidores de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), combustível fóssil muito utilizado em plantas industriais para uso em secagem direta ou indireta através de produção de vapor em caldeiras, as empresas que convergem em ações para reduzir as emissões na atmosfera e o impacto ambiental, buscam fazer uso de modais energéticos menos poluentes, sendo esse o caso do uso GLP. Trata-se de um combustível originado das partes mais voláteis durante o refino do petróleo para obtenção dos diversos combustíveis fósseis derivados do Petróleo. O GLP está entre os menos poluentes obtidos a partir do petróleo com reduzida taxa de emissões de gás de efeito estufa (CO_2). No entanto, também oferece alguma emissão, além de ser um produto perigoso. Foi demonstrado um comparativo dos custos que algumas empresas pesquisadas que investem no consumo do GLP no segmento industrial e do agronegócio, conforme mostrado no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Custos de aquisição com GLP para produzir vapor em Caldeiras



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com a determinação do preço médio pago atualmente no GLP através do gráfico chegou-se no valor de R$5,915/kg ou R$5.915,00/t para um volume médio consumido de 82.500 kg do referido combustível, ou seja, uma despesa mensal direta com o insumo em torno de R$487.987,50. Para efeito de valores comparativos para analisar o retorno do investimento no projeto CLF foram usados parâmetros de uma empresa consumidora de GLP que gera vapor através de caldeiras convencionais para fornecer energia térmica aos processos de secagem de grãos e que será visto mais adiante.

5.10 Análise de viabilidade do projeto de aquisição do CLF

O comparativo de custos para verificar a viabilidade do projeto de aquisição do concentrador solar CLF simulado no *TRNSYS* levou em conta a quantidade de energia economizada no decorrer de um ano inteiro, levando em conta os dados climáticos de cada cidade estudada neste trabalho. Após analisar a energia total disponibilizada no CLF em cada cidade para gerar vapor e promover a redução do consumo de combustível fóssil se tornou possível saber qual seria a contribuição da redução do uso do sistema auxiliar na geração de vapor, deixando de ser utilizado para manter o fornecimento de energia térmica para o projeto simulado no decorrer de todo o período simulado. Desta maneira pode-se chegar à economia anual com o combustível fóssil (GLP) utilizado na caldeira na geração de vapor. Para se obter

o valor de GLP economizado foi usada a Equação 30. A quantidade de combustível economizada foi mostrada no Gráfico 4.

$$GLP = \frac{E_{CLF}}{46.465} \quad (30)$$

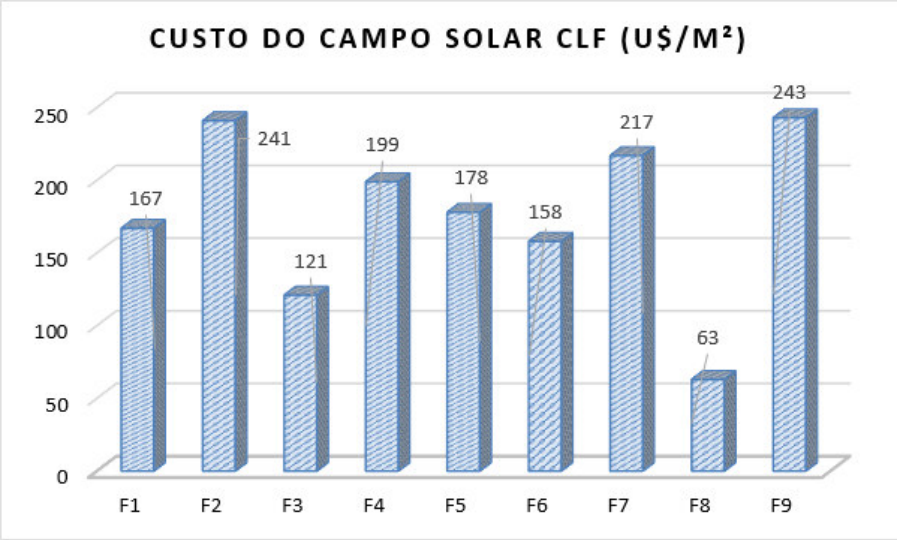
Sendo: GLP – gás liquefeito do petróleo, E_{CLF} – Energia gerada no concentrador linear Fresnel, 46.465 – o poder calorífico inferior do GLP em kJ/kg - Fonte: (Balanço Energético Brasileiro – MME, 2017).

Para se saber os valores a serem investidos em um sistema com a tecnologia de CLF foi considerado como parâmetro o valor médio em relação aos custos de orçamentos em um projeto realizado na Califórnia - EUA, visando atender a demanda de produção direta de vapor, buscando desenvolver a tecnologia de campo solar Fresnel e na expectativa de fornecer energia térmica ou vapor na cidade de San Diego, Califórnia. Os orçamentos foram realizados através de uma cotação com doze diferentes fornecedores de CLF, considerando os seguintes parâmetros:

- Capacidade de 10 MW;
- Produção de vapor saturado a 200°C;
- Área disponível de 20 hectares;

Dos fornecedores contatados, nove apresentaram seus orçamentos, com os resultados indicando um custo médio de US$183,33/m² de área para um CLF, essa média desconsiderou os valores extremos (F8 e F9) da cotação em função de ter sido um valor , conforme mostrou o Gráfico 6.

Gráfico 6 – Custos de aquisição de campo solar Fresnel



Fonte: Adaptado NREL (2015).

Segundo Kurup e Turchi (2015), soma-se ao custo médio do CLF um custo de instalação que é em torno de U$50,00/m². As análises econômicas para aquisição e instalação de um Concentrador Linear Fresnel forma determinadas pelas Equações 31, 32 e 33.

$$VPL = \sum_{j=1}^{n} \frac{FC}{(1+TMA)^j} - Iv \tag{31}$$

$$0 = \sum_{j=1}^{n} \frac{FC}{(1+TIR)^j} - Iv \tag{32}$$

$$PAYBACK = N_{apb} + \left(\frac{-FC_{apb}}{FC_{Apb}}\right) \tag{33}$$

Sendo:

VPL – Valor presente líquido; - TIR – Taxa interna de retorno; - Iv - Valor inicial do investimento; - j – Período do projeto para se ter retorno; - TMA - Taxa mínima de atratividade ao ano; - N_{apb} – Número do ano anterior ao *Payback*; - FC_{apb} – Fluxo de caixa acumulado ano anterior ao *PayBack*; - FC_{Apb} – Fluxo de caixa atualizado no ano de *Payback*.

Para análise da viabilidade econômica do projeto foi preciso fazer uma análise financeira que para apontar a possível atratividade no investimento em um CLF. Com isso, foram usados

os parâmetros de custos para aquisição de um Concentrador Linear Fresnel disponível no mercado. Usou-se os parâmetros do fabricante *SOLATOM* com capacidade de 14,5 kW de potência cada módulo ou 549 W/m². Assim sendo, pode-se fazer um comparativo entre os valores com energia economizada de combustível fóssil e o investimento na aquisição com um Concentrador Linear Fresnel para gerar a mesma quantidade de energia térmica.

Com a obtenção dos valores demonstrados de aquisição de um CLF e custos relativos à montagem do sistema e as referências de taxas de importação foi possível verificar o retorno do investimento. Tendo também o custo médio do GLP a R$5,915/kg foi possível calcular a economia gerada em valor monetário relativa à redução de consumo de combustível fóssil gerada em função da produção direta de vapor em um CLF.

Em uma pesquisa em campo pode-se ter os parâmetros relacionados mais adiante de uma situação real, tendo uma organização do segmento do agronegócio um consumo médio mensal de 55.000 kg/mês de GLP, usados para gerar vapor aos seus processos de secagem através de uma caldeira, daí podendo comparar com a capacidade de geração de vapor do CLF apresentado neste trabalho, considerado um regime de trabalho de 24 horas diárias. A partir disso, pode-se através de uma avaliação simples de cálculo de *VPL*, *TIR* e "*PayBack*", em quantidade de anos, devidamente calculados, chegar à viabilidade ou não do projeto.

- Demanda de energia com uso de GLP (55.000 kg/mês = 2.203,3 GJ/mês em processo de secagem);
- 72 módulos de potência térmica, com capacidade aproximada total teórica de 1.044 kW;
- Área total de 1.900 m²;
- Iv - Valor inicial do investimento apenas no CLF: U$347.700,00;
- j – Período máximo de retorno do projeto (considerado 5 anos);
- TMA - Taxa mínima de atratividade ao ano: depende se o investidor é mais arrojado ou conservador. A taxa varia entre a taxa SELIC e dessa descontada a inflação anual projetada ou a inflação do ano anterior, comum em investimentos de instalações industriais – arbitrado 10%);
- FC – Fluxo de caixa: fluxo de caixa retornado: é a parcela monetária da quantidade de combustível (GLP) que deixará de ser consumido a partir do uso do CLF.

Assim sendo, neste ponto foram considerados os custos com a importação dos módulos do Concentrador Linear Fresnel que demanda dos seguintes parâmetros e respectivas taxas e valores, como listados:

- Valor do câmbio em 12.12.2023 (U$1,00 = R$4,95);
- Valor do bem de capital de U$ 183,00/m² (R$905,85/m² = R$1.721.115,00) ;
- Custo de montagem de U$50,00/m² (R$247,50/m² = R$470.250,00)
- Taxa aduaneira de 18% do valor do bem de capital (R$309.800,70);
- Taxa de importação de 6% (R$103.266,90);
- Taxa de IPI de 6,5% (R$111.872,48);
- Taxa do PIS de 2,1% (R$36.143,42);
- Taxa de COFINS de 9,65% (R$166.087,60);
- Frete de importação (estimado R$150.000,00);
- Total do investimento (R$3.068.536,00).

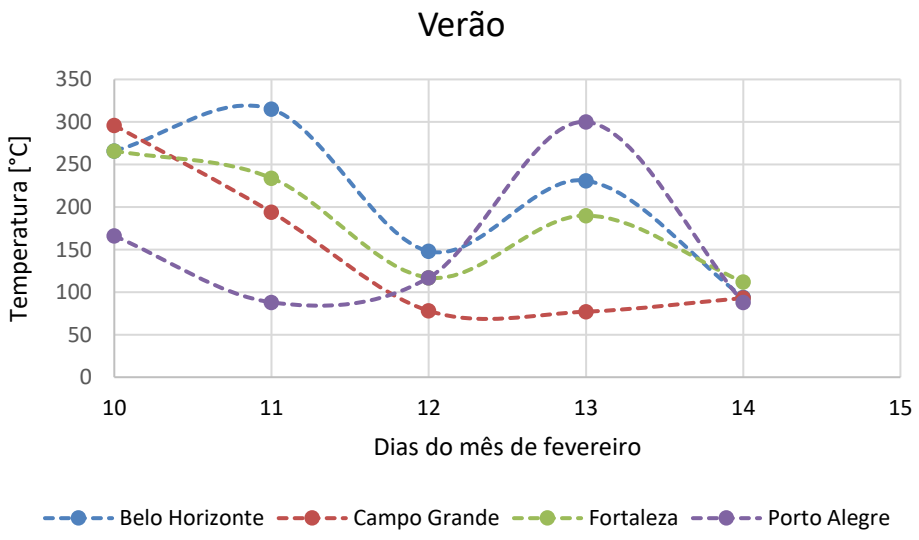
Observação: No que se refere as alíquotas de importação observa-se que a partir de *agosto de 2023* houve redução de alíquotas do imposto para importação sobre bens de capital, conforme a ***RESOLUÇÃO GECEX Nº 512, DE 16 DE AGOSTO DE 2023,*** que dispõe sobre reduções temporárias da alíquota do Imposto de Importação para bens de capital - BK e bens de informática e telecomunicações - BIT sem capacidade de produção nacional equivalente, na condição de Ex-tarifário. No entanto, para efeito de viabilidade no contexto deste trabalho serão mantidas as alíquotas relacionadas.

Independentemente da possibilidade de aquisição de um sistema de concentração solar com o uso de um CLF há também a possibilidade de nacionalizar boa parte do CLF, além da montagem que nacionalmente se torna mais viável com custos mais acessíveis, principalmente no que se refere a estrutura do módulo solar, pois, trata-se de uma estrutura mais simplificada e de fácil construção se comparada as estruturas dos demais concentradores solares. No entanto, considerando os valores expostos anteriormente com uma possível importação do sistema CLF completo foi possível fazer uma análise financeira sobre o retorno do investimento com uso de planilhas financeiras.

6 RESULTADOS

Conforme os gráficos apresentados na sequência as simulações apontaram que há variações consideráveis no perfil de temperaturas, na disponibilidade de energia através do CLF nos períodos de radiação e da demanda de complemento de energia fornecida pela caldeira auxiliar para a geração direta de vapor que compõem o Concentrador Linear Fresnel nas cidades estudadas. As variações foram função dos períodos de dias e de estações distintas do ano, considerando dias subsequentes e em função das condições meteorológicas de cada região. As variações apresentadas já eram esperadas já que se trata de sistema transiente que é função exclusivamente das variações climatológicas e da disponibilidade de radiação nos períodos analisados. Quanto mais longo é o período de análise e das simulações mais assertivos são os resultados, pois, conforme observados nas simulações e gráficos apresentados, quando se analisa apenas dias específicos pode gerar resultados não satisfatórios, isso torna a avaliação e simulação no período inteiro de um ano mais apropriada para o atingimento dos resultados em cada cidade estudada. O Gráfico 7 mostra o perfil de temperaturas na saída do CLF modelado para as cidades de interesse no período do verão.

Gráfico 7 – Perfil das temperaturas na saída do CLF período do verão



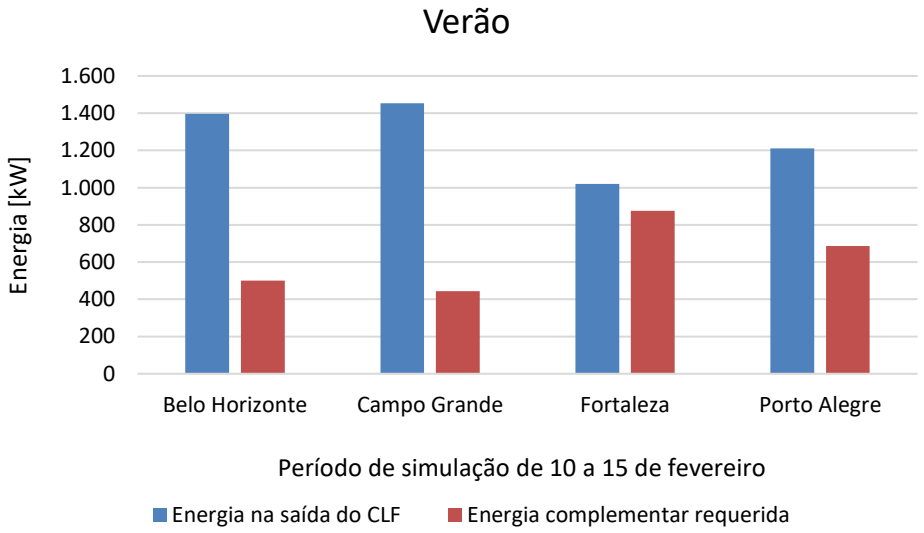
Fonte: Elaborado pelo autor.

No período do verão o destaque foi para a cidade de Belo Horizonte que apresentou temperaturas acima de 150° C em quase todo o período simulado. De forma surpreendente a cidade de Fortaleza, normalmente com maior disponibilidade de radiação no decorrer do ano,

indicou um perfil de temperatura abaixo de 200° C e do esperado. Possivelmente deve ser uma função das condições climáticas específicas do período em que se deu a simulação do modelo. Isso reforça a necessidade de fazer uma análise pelo período de um ano inteiro para que nas simulações todas as variações e situações específicas possam ser consideradas nas análises das respectivas simulações.

Seguindo com as análises das simulações foi apresentada para o período de verão a energia gerada pelo CLF e a energia complementar demandada na caldeira auxiliar para promover a geração de vapor aos processos fabris, conforme indicado no Gráfico 8.

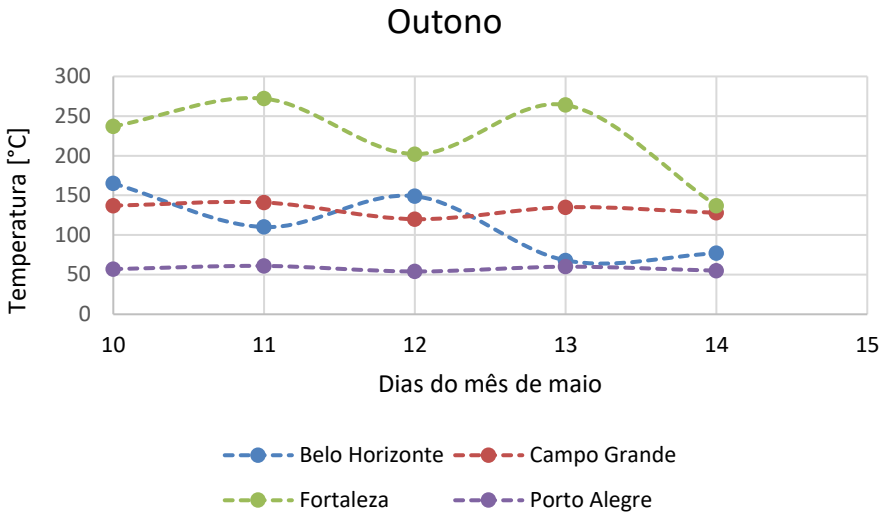
Gráfico 8 – Relação da energia produzida no CLF e do complemento da caldeira auxiliar no período de verão e da radiação disponível



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No período do outono o perfil das temperaturas na saída do CLF sofreu alterações bastantes significativas se comparado ao perfil do verão para as cidades estudadas, conforme mostrado no Gráfico 9.

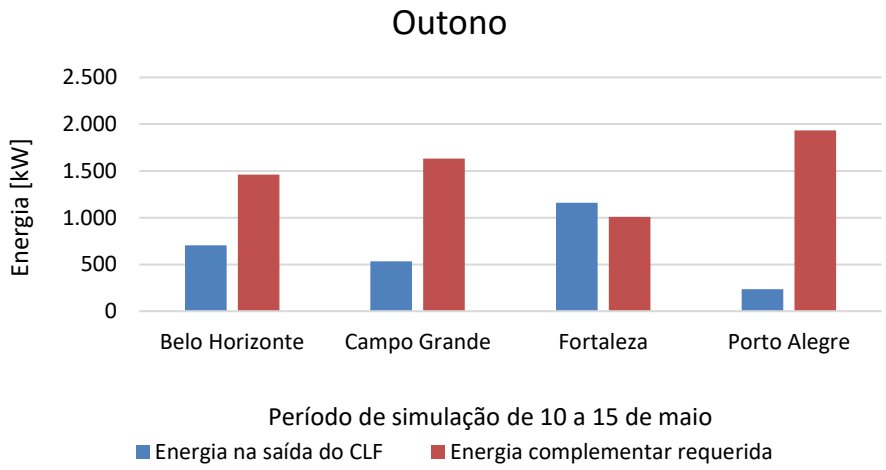
Gráfico 9 – Perfil das temperaturas na saída do CLF período do outono



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O destaque positivo foi para a cidade de Fortaleza – CE que manteve uma média acima de 200° C, dentro do período analisado, em contrapartida as demais cidades não conseguiram manter o CLF como sistema autônomo de geração direta de vapor, tendo a necessidade de usar a caldeira auxiliar para manter a demanda de energia térmica aos processos. Como consequência de o perfil de temperaturas ficar abaixo para favorecer a geração direta de vapor no CLF é necessário o consumo maior de combustível fóssil para manutenção dos processos com demanda maior de energia adicional, conforme mostrado no Gráfico 10.

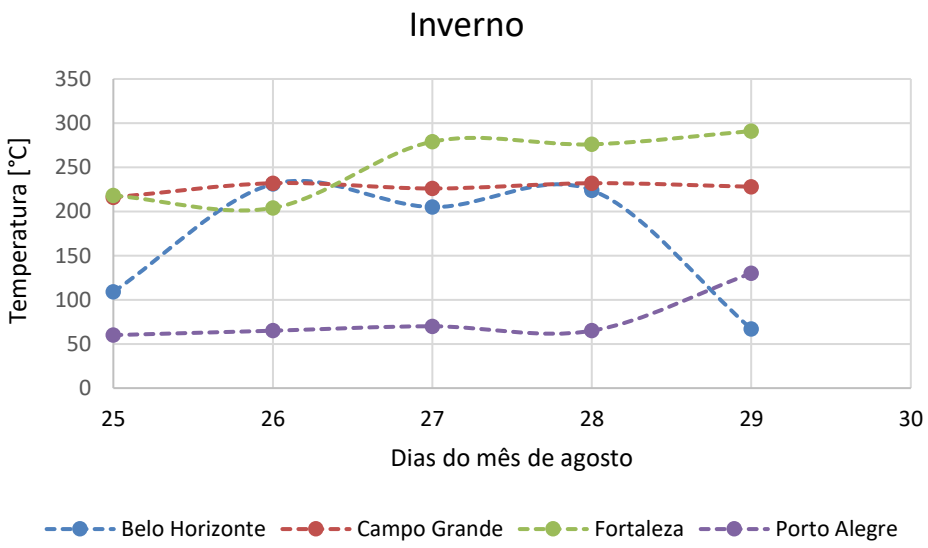
Gráfico 10 – Relação da energia produzida no CLF e do complemento da caldeira auxiliar no período de outono e da radiação disponível



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No período do inverno as simulações mostraram, pela análise do perfil de temperaturas neste período, que ainda não se pode trabalhar com o CLF de forma autônoma durante os períodos de radiação disponível, mas, no inverno a demanda por energia complementar ao CLF foi menor que no período de verão para manter os processos térmicos demandados na simulação do *TRNSYS*. O perfil de temperaturas no período do inverno está mostrado na Gráfico 11.

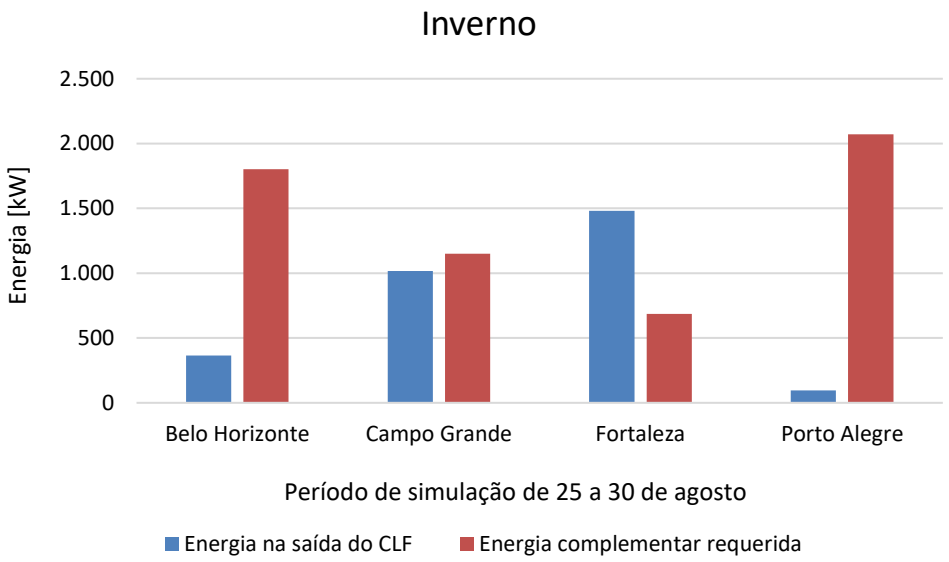
Gráfico 11 – Perfil das temperaturas na saída do CLF período do inverno



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Relativa à demanda de energia térmica houveram destaques para as cidades de Fortaleza - CE e de Campo Grande – MS que demandaram menos energia adicional da caldeira auxiliar, conforme mostrado no Gráfico 12.

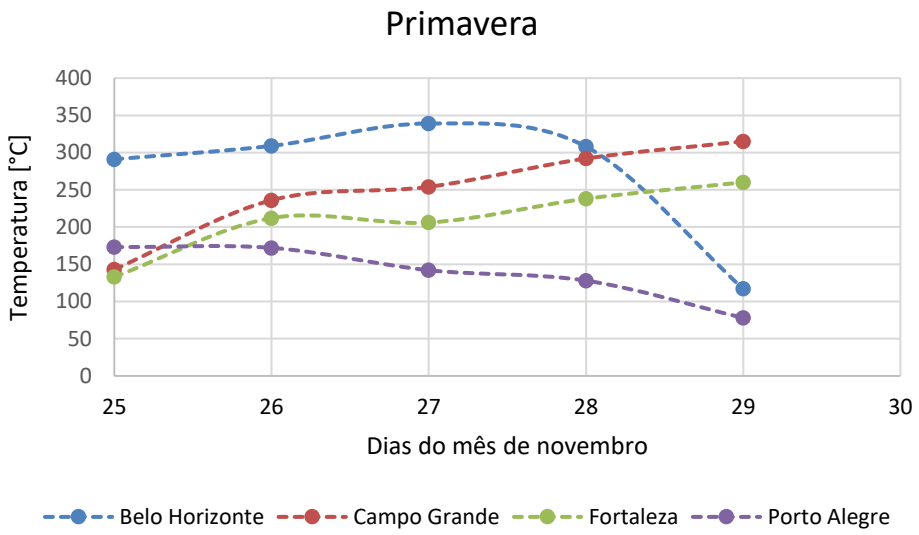
Gráfico 12 – Relação da energia produzida no CLF e do complemento da caldeira auxiliar no período de inverno e da radiação disponível



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A cidade de Belo horizonte, considerando o período analisado, o Concentrador Linear Fresnel mostrou-se mais efetivo nos períodos de verão e primavera, com temperatura máxima momentânea decorrente da radiação local disponível acima de 300° C acompanhada por Campo Grande com bom desempenho. A cidade de Fortaleza mostrou-se ter radiação favorável, considerando os períodos analisados. Isso é indicativo de que o Concentrador Linear Fresnel pode trabalhar de forma mais autônoma na região Nordeste do Brasil. Trata-se de uma região com médias de temperaturas mais elevadas que as demais regiões brasileiras, além de ser uma região com menor índice de precipitação. Mesmo nos períodos com menores índices de radiação, as temperaturas em Fortaleza se mostraram no patamar mínimo necessário para se produzir vapor no campo solar Fresnel. As temperaturas médias atingiram acima de 150° C, o que favorece ao projeto simulado. O Gráfico 13 foi mostrado o perfil de temperaturas na saída do CLF no período da primavera.

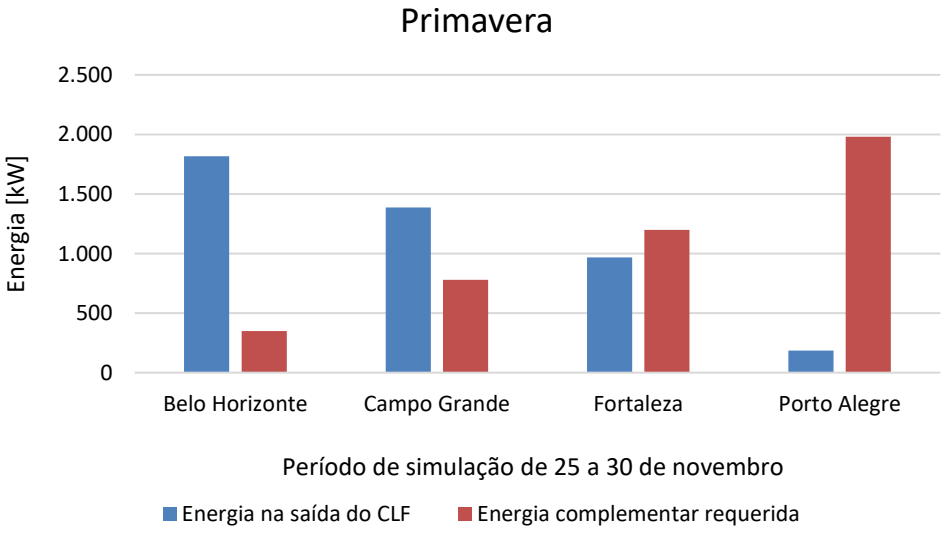
Gráfico 13 – Perfil das temperaturas na saída do CLF período da primavera



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No que se refere a energia complementar fornecida pela caldeira auxiliar, no período da primavera, de acordo com as simulações, somente a cidade de Porto Alegre demanda uma quantidade maior de energia para manutenção dos processos térmicos em relação as demais cidades estudadas, conforme mostrado no Gráfico 14.

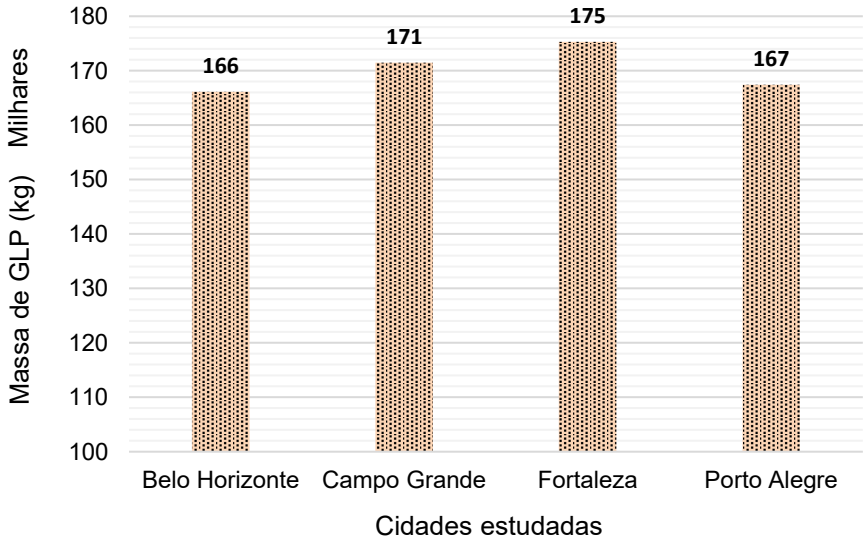
Gráfico 14 – Relação da energia produzida no CLF e do complemento da caldeira auxiliar no período da primavera e da radiação disponível



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No caso específico da cidade de Porto Alegre, se levado em conta somente os períodos analisados, mostrou-se ser a localidade menos indicada para se instalar um Concentrador Linear Fresnel, devido ao perfil de temperaturas apresentado. Neste caso, o sistema de apoio para geração direta de vapor funcionará com maior frequência. Então, para evitar uma interpretação equivocada, foi feita uma simulação anual, obtendo a partir disso, a quantidade anual de energia gerada pelo CLF em cada cidade estudada. Mesmo nas situações em que a energia gerada no CLF não ser o suficiente para gerar vapor permite que a caldeira auxiliar não trabalhe em carga máxima na geração de vapor, mantendo apenas uma quantidade de energia adicional ao sistema, ainda sim gerando economia de combustível fóssil, neste caso, economia de GLP, sendo esse o modal de energia usado nos exemplos deste trabalho. As simulações realizadas apenas em dias específicos ou sequenciais de curto período podem fornecer dados não completos para poder determinar nas escolhas de localidades mais apropriadas para se instalar uma planta solar com Concentrador Linear Fresnel, não retratando toda a realidade e capacidade de uma dada região. Para melhor entendimento do exposto, usou-se a Equação 30 para calcular a quantidade anual de GLP que deixou de ser usado na caldeira auxiliar em detrimento da energia térmica total gerada no CLF, conforme mostrado no Gráfico 15.

Gráfico 15 – Economia anual com GLP, combustível do sistema auxiliar



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para analisar a atratividade econômica do projeto, após as simulações foi realizada uma análise financeira que indicou retorno satisfatório na aquisição de um campo solar com CLF,

considerando a economia gerada na redução de consumo de combustível fóssil considerado neste trabalho. Para isso, usou-se os parâmetros de custos para aquisição de um Concentrador Linear Fresnel, já relacionados anteriormente. Também foi usado o padrão de módulos de CLF já existente no mercado, sendo utilizados os módulos do fabricante *SOLATOM.* Seus módulos possuem capacidade nominal de 14,5 kW de potência cada um ou 549 W/m². Assim sendo, pode-se fazer um comparativo entre os investimentos com energia economizada com o combustível de origem fóssil e os valores a serem investidos em um campo solar com um Concentrador Linear Fresnel para gerar a mesma quantidade de energia térmica. Com a obtenção dos valores dos módulos de um CLF já demonstrados foi possível calcular o retorno do investimento em adquirir um CLF através das Equações 31, 32 e 33 conforme mostrado na Tabela 7.

[1]**Tabela 7 –** Resultados financeiros referentes ao investimento da compra de um CLF

Cidade	DNI média (kWh/m²dia)	Economia anual de GLP (kg x 1000)	Custo do GLP (R$/kg)	Economia anual (R$ x 1000)	VPL (R$ x 1000)	Retorno (anos)	Retorno (meses)
BELO HORIZONTE	5,50	166,00	5,92	981,89	1.711,72	3,93	45
CAMPO GRANDE	5,40	171,00	5,92	1.011,47	1.855,70	3,80	44
FORTALEZA	5,90	175,00	5,92	1.035,13	1.970,89	3,70	42
PORTO ALEGRE	4,90	167,00	5,92	987,81	1.740,51	3,91	43

Fonte: Elaborado pelo autor

A TMA (%) representa a taxa mínima de atratividade ou taxa de desconto, é a taxa de referência em relação ao mercado financeiro para mostrar a viabilidade do projeto, ela é a taxa indicativa de quanto o investido estar disposto a pagar por um investimento, baseado no fluxo de caixa que retorna, ou seja, o lucro ou valores que retornam ao caixa em função de dado investimento. VPL é o fluxo de caixa descontado pela TMA indicada. É a diferença entre o valor do somatório das entradas com o somatório das saídas do caixa. O *PayBack* é o cálculo que representa o tempo de retorno de um investimento, foi considerado em anos, mostrando o prazo em que o projeto terá retorno do investimento. A TIR (%) é a taxa interna de retorno e usada apenas como comparação com a TMA, TIR é a taxa que torna o VPL nulo, ou seja, é a taxa que substitui a TMA e faz com que o VPL seja zero. O cálculo da TIR é feito por aproximações sucessivas. Em tese se a TIR > TMA o projeto deve ser aprovado, no caso

[1] Na avaliação dos custos foram considerados os custos de importação do equipamento.

da TIR < TMA isso é indicativo que o projeto pode não ser viável, devendo fazer comparativos com valores totais do investimento para uma análise mais detalhada ou rejeitar o projeto. No caso do VPL, seu limite é zero, se for negativo, certamente o projeto deve ser rejeitado.

Os resultados financeiros, numa avaliação simples, apontaram a viabilidade do projeto para aquisição de um campo solar contendo módulos de CLF para processos fabris que demandam energia térmica com temperaturas até 150° C. Quanto maior a disponibilidade de radiação local, mais viável se torna o uso de um CLF como fonte de energia térmica na geração direta de vapor. Nos cálculos de retorno de investimento, quando comparado a disponibilidade de radiação em todo um ano nas cidades estudadas, mesmo em cidades com DNI com menores índices de radiação, mostraram ter bom potencial de usar um campo solar com CLF para atender demandas térmicas de baixas temperaturas em processos industriais. Os valores recuperados com gastos em combustível fóssil, considerando as cidades estudadas foram diferentes para cada uma delas, mostrando oportunidades distintas entre elas no que se refere a disponibilidade de radiação para a produção direta de vapor no decorrer do ano, mas todas com viabilidade financeira.

7 CONCLUSÃO

A tecnologia de concentrador solar do tipo linear Fresnel (CLF) pode ser utilizada como uma alternativa para geração de energia térmica, visando a geração direta de vapor para proporcionar o fornecimento de calor em processos industriais e do agronegócio, seja no aquecimento do fluxo de ar para utilização processos de aquecimento e secagem ou para troca térmica com outros fluidos para inserção em processos fabris diversos. As simulações apontaram para a funcionalidade e viabilidade técnica no uso de um Concentrador Linear Fresnel para geração direta de vapor, com a modelagem atingindo 169,44 kW, energia teórica para produzir 220,35 kg/h de vapor ou 73,45% em relação ao modelo projetado. Com tudo, foi preciso fazer um estudo econômico de aquisição de um campo solar Fresnel para verificar a sua viabilidade financeira que difere o retorno de aquisição de CLF em função da disponibilidade de radiação nas regiões estudadas. Os custos de aquisição de um Concentrador Linear Fresnel foram baseados no câmbio de *R$ 4,95 para US$1,00*. Neste trabalho foi considerado os custos com a importação dos módulos, mas há a possibilidade de nacionalizar a parte estrutural do CLF e sua respectiva instalação, o que o tornaria mais atrativo para aquisição. A análise econômica mostrou ainda que o retorno do investimento em um Concentrador Linear Fresnel varia em função da localidade a ser instalada o campo solar, pois, sua eficácia depende da quantidade de dias no ano em que se terá radiação disponível.

O Concentrador Linear Fresnel é uma alternativa promissora para complementação da matriz energética do parque industrial brasileiro. O Concentrador Linear Fresnel simulado tem o seu desempenho na produção direta de vapor como uma função direta do comportamento da radiação em cada região estudada, conforme apontaram os resultados das simulações. É importante observar que uma forma de elevar o desempenho do CLF e manter o sistema funcionando de forma mais contínua e constante é usando o calor residual dos processos. Para tanto, compôs o campo solar uma caldeira auxiliar na geração de vapor que funciona também como um tanque para acumulação de vapor. Desta forma, pode-se equalizar as temperaturas do CLF, além de armazenar a energia disponível gerada para manter a continuidade dos processos, favorecendo ao controle de todo o sistema, evitando as grandes variações de temperaturas. Outra vantagem é a possibilidade de reduzir as pressões de trabalho com consequente redução das temperaturas de saturação para gerar vapor. Isso permite aproveitar ao máximo o calor gerado no sistema para atender demanda de processos com temperaturas e pressões reduzidas.

7.1 Indicação de Trabalhos Futuros

Como pesquisa futura é sugerida a construção de protótipo, devido ao fato de o CLF ser construído de forma modular, permitindo realizar testes práticos e com complemento de mais simulações no *TRNSYS*, para gerar comparações mais assertivas entre modelagem e resultados práticos, podendo proporcionar diversas situações e combinações possíveis. Pode-se também fazer um CLF interligado em sistemas híbridos para gerar energia elétrica em áreas remotas sem disponibilidade de redes de transmissões de energia elétrica. O CLF pode ser uma boa opção para uso em empreendimentos do agronegócio, proporcionando autonomia em secagem agrícola de grãos, aquecimento de aviários ou como complemento de demanda por energia térmica neste segmento da economia. A energia solar pode contribuir fortemente para a obtenção de calor para processos industriais, favorecendo a substituição de parte dos combustíveis fósseis utilizados no setor industrial, não só diretamente, mas também indiretamente, reduzindo o consumo de energia elétrica e de combustíveis fósseis.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10899**: energia solar fotovoltaica: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ALMEIDA, Geraldo Samuel Marques. **Pesquisa e desenvolvimento de um sistema termoelétrico do tipo linear fresnel reflector.** 2013. Mestrado (Dissertação em Energias Renováveis) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

BASSALO, José Maria Filardo. Fresnel: o formulador matemático da teoria ondulatória da luz. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física,** v. 5, n. 2, p. 79-87, 1988.

BELLOS, Evangelos; TZIVANIDIS, Christos; PAPADOPOULOS, Angelos. Secondary concentrator optimization of a linear Fresnel reflector using Bezier polynomial parametrization. **Solar Energy,** v. 171, p. 716-727, 2018.

BENYAKHLEF, S. *et al.* Impact of heliostat curvature on optical performance of Linear Fresnel solar concentrators. **Renewable Energy,** v. 89, p. 463-474, 2016.

BELTAGY, Hani *et al.* Theoretical and experimental performance analysis of a Fresnel type solar concentrator. **Renewable Energy,** v. 101, p. 782-793, 2017.

BIZZO, W.A. **Geradores de vapor**. Campinas: Universidade Federal de Campinas, 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Anuário da cerveja 2022.** Brasília: MAPA/SDA, 2023. ISBN 978-85-7991-216-0.

BROGNI, P. M. *et al*. Conception and evaluation of a tracking system for a linear Fresnel concentrator. *In:* INTERNACIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING (COBEM), 24., 2017,Curitiba. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: ABCM, 2017.

CAMPOS, Mayara Soares; ALCANTARA, Licinius DS. Interpretação dos efeitos de tempo nublado e chuvoso sobre a radiação solar em Belém/PA para uso em sistemas fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Meteorologia,** v. 31, p. 570-579, 2016.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica.** 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Geração heliotérmica: princípios e tecnologias**. Diego C. Malagueta. Rio de Janeiro: CRESESB/CEPEL, julho 2012. Disponível em: http://www.cepel.br/cresesb. Acesso em: 20 out. 2023

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. **CRECESB**: potencial solar: SunData V 3.0: cálculo da irradiação no plano inclinado. MME, 2023.

CRUZ, Jorge Alejandro Monreal. **Diseño de un concentrador solar lineal tipo Fresnel de baja entalpía para calor de procesos**. 2012. Mestrado (Disertacion en Ingeniería Energética) – Universidad Veracruzana, México, 2012.

DESPOTOVIC, Milan *et al.* Review and statistical analysis of different global solar radiation sunshine models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v. 52, p. 1869-1880, 2015.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. Solar engineering of thermal process. **A Wiley-Interscience Publicaytion, Estados Unidos da América**, v. 2, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balanço energético nacional 2023: ano base 2022.** Rio de Janeiro: EPE, 2023.

ENTERIA, Napoleon; AKBARZADEH, Aliakbar, eds. **Solar energy sciences and engineering applications.** Boca Raton: CRC Press, 2013.

FERNÁNDEZ-GARCÍA, A. *et al.* Parabolic-trough solar collectors and their applications. **Renewable and sustainable energy reviews,** v. 14, n. 7, p. 1695-1721, 2010.

FRÖHLICH, Claus. Solar irradiance variability since 1978: revision of the PMOD composite during solar cycle 21. In: **SOLAR VARIABILITY AND PLANETARY CLIMATES**, p. 53-65, 2007.

GRENA, Roberto; TARQUINI, Pietro. Solar linear Fresnel collector using molten nitrates as heat transfer fluid. **Energy**, v. 36, n. 2, p. 1048-1056, 2011.

GÜNTHER, Matthias *et al.* **Advanced CSP teaching materials chapter 6 linear Fresnel technology**. EnerMENA, 2006.

HABERLE, A. *et al.* Linear concentrating Fresnel collector for process heat applications. In: SOLAR PACES, 13, 2006, Sevilha, Espanha. **Anais** [...]. Sevilha, 2006.

HAMILTON, Calvin J. **Sistema solar.** 2022. Disponível em http://astro.if.ufrgs.br/solar/solarsys.htm#comp. Acesso em: 28 dez. 2022.

INDUSTRIAL SOLAR GMBH. Coletor Fresnel - Outro (30 m²). Programa Investimentos Transformadores em Eficiência Energética na Indústria - PotencializEE. Adicionado em: 14 nov. 2023. Disponível em: https://tecnologias.programa-potencializee.com.br/produto/coletor-fresnel. Acesso em: 7 dez. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE**. IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation.** Renewable Energy, v. 20, n. 11, 2011. Disponível em: https://www.uncclearn.org/wp-content/uploads/library/ipcc15.pdf. Acesso em: 20 set. 2023.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Renewable energy technologies: Cost analysis series: concentrating solar power. **International Renewable Energy Agency (IRENA),** v. 1, p. 274, 2012.

JRADI, Muhyiddine; RIFFAT, Saffa. Medium temperature concentrators for solar thermal applications. **International Journal of Low-Carbon Technologies,** v. 9, n. 3, p. 214-224, 2014.

KALOGIROU, SOTERIS, **Solar energy engineering**: processes and systems. 1ª ed. Oxford: Elsevier Inc., 2009.

KURUP, Parthiv; TURCHI, Craig. **Initial investigation into the potential of CSP industrial process heat for the Southwest United States.** Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2015.

MAGACHO, Isabela Tereza; SILVA, Gustavo Borges E.; DE CASTRO, Gabriel Gonçalves Pessoa. Desenvolvimento de um motor stirling movido a energia solar. **Brazilian Journal of Development,** v. 5, n. 11, p. 27296-27306, 2019.

MAHESH, P.; REDDY, Y. Venkatrami; SREEDHAR, D. A Survey on recent technologies in concentrated solar power generation. **International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)**, v. 3, p. 5-10, 2015.

MEDEIROS, Carlos Augusto Guimarães; MARTINS, André Mendes. Geometria sol-terra: revisão didática com ênfase no hemisfério sul e direcionada pela ABNT NBR 10899: 2013. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 8., 2020, Fortaleza. **Anais** [...]. Fortaleza: Associação Brasileira de Energia Solar, 2020. Disponível em: https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/747. Acesso em: 10 set. 2023.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; ROCHA, Carlos Roberto; NOGUEIRA, Fábio José Horta. **Eficiência energética no uso de vapor.** Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005. Disponível em: https://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/LivroVapor.pdf. Acesso em: 20 jun. 2023.

OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. **Astronomia e astrofísica.** São Paulo: Livraria da Física, 2014.

PATNODE, Angela M. **Simulation and performance evaluation of parabolic trough solar power plants.** 2006. Masters (Dissertations Mechanical Engineering) – University of Wisconsin-Madison, Madison, 2006.

PIGOZZO FILHO, Victor César *et al.* Projeto, construção e testes de um protótipo concentrador solar Fresnel linear para geração direta de vapor para processos industriais. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2018, Gramado. **Anais** [...]. Gramado, 2018.

PIGOZZO, FILHO, Victor César. **Desenvolvimento e análise experimental de um Concentrador Solar Fresnel Linear para geração direta de vapor.** 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – LEPTEN – Florianópolis, 2019.

PINO LUCENA, Francisco Javier *et al.* Experimental validation of an optical and thermal model of a linear Fresnel collector system. **Applied Thermal Engineering,** v. 50, n. 2, p.1463-1471, 2013.

QIU, Yu *et al.* Study on optical and thermal performance of a linear Fresnel solar reflector using molten salt as HTF with MCRT and FVM methods. **Applied energy,** v. 146, p. 162-173, 2015.

REIS, Ruibran Januário dos; TIBA, Chigueru (Org.). **Atlas Solarimétrico de Minas Gerais-Volume II**. Belo Horizonte: Futura Express, 2016.

REYNOLDS, David J. *et al*. An experimental and computational study of the heat loss characteristics of a trapezoidal cavity absorber. **Solar Energy,** v. 76, n. 1-3, p. 229-234, 2004.

RUNGASAMY, A. E.; CRAIG, K. J.; MEYER, Josua P. A review of linear Fresnel primary optical design methodologies. **Solar Energy,** v. 224, p. 833-854, 2021.

SILVA, António Sérgio Ribeiro. **Estimativa de produção em centrais solares de concentração.** 2010. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) – Universidade do Porto, Porto, 2010.

SINGH, Panna Lal; SARVIYA, R. M.; BHAGORIA, J. L. Thermal performance of linear Fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers. **Applied Energy**, v. 87, n. 2, p. 541-550, 2010.

SOLARPACES. **Solar power and chemical energy systems**. Solar dish engine. Disponível em: https://www.solarpaces.org/how-csp-works/. Acesso em: mar. 2023.

SOLAR PAYBACK. **Energia termossolar para a Indústria**. Disponível em: https://www.solar-payback.com/?lang=pt-br. Acesso em: jul. 2023.

SOLATOM. **Fábrica de módulos de concentrador Fresnel.** Disponível em: https://solatom.com/ingenieria. Acesso em: 15 jul. 2023.

SOUZA, Leonardo Faustino Lacerda; FRAIDENRAICH, Naum. Concentrador linear Fresnel com geometria aplanática. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR – CBENS, 2020, Fortaleza. **Anais** [...]. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear, 2020.

STINE, William B.; GEYER, Michael. **Power from the Sun. Power from the Sun.net**, 2001. Disponível em: http://www.powerfromthesun.net. Acesso em: 30 jul. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Laboratório de engenharia de processos de conversão e tecnologia de energia (LEPTEN)**. [Florianópolis: UFSC], 2018.

VALENZUELA, Loreto *et al.* Control scheme for direct steam generation in parabolic troughs under recirculation operation mode. **Solar energy**, v. 80, n. 1, p. 1-17, 2006.

VALENZUELA, Loreto *et al.* Direct steam generation in solar boilers. **IEEE Control systems magazine,** v. 24, n. 2, p. 15-29, 2004.

VAZZOLER, Alex. **Fundamentos de sistemas solares térmicos**: um guia introdutório. Rio de Janeiro, 2021.

WAGNER, Michael J. **Simulation and predictive performance modeling of utility-scale central receiver system power plants.** 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – University of Wisconsin-Madison, Madison, 2008.

ZARZA MOYA, Eduardo. **Generación directa de vapor con colectores solares cilindro parabólicos Proyecto DIrect Solar Steam (DISS).** 2003. Tese (Doctoral Ingeniería Energética) – Universidad de Sevilla, Servilla, 2003.

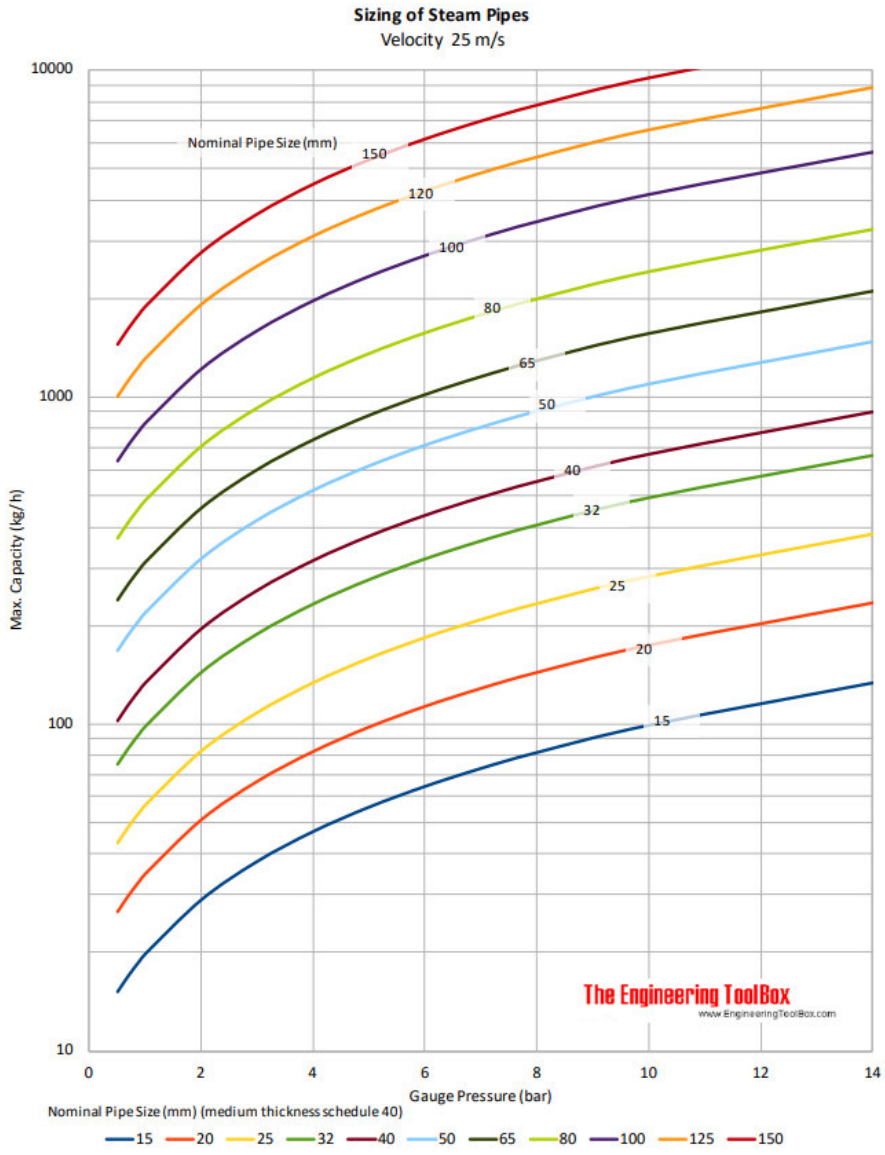
ZHU, Guangdong *et al.* History, current state, and future of linear Fresnel concentrating solar collectors. **Solar Energy**, v. 103, p. 639-652, 2014.

APÊNDICE A

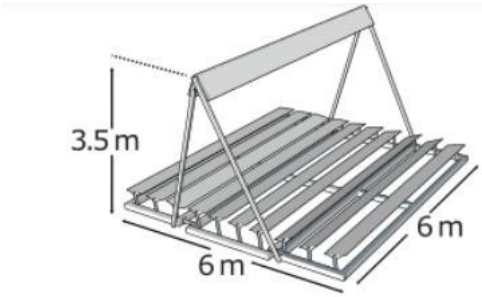
Tabela para Dimensionamento de tubulação de vapor.

Dimensionamento de tubos de vapor (https://www.engineeringtoolbox.com/steam-pipes-sizes-d_258.html)												
Capacidade *(kg/h)*												
Pressão manométrica	**Velocidade do Vapor**	**Diâmetro nominal do tubo *(mm)***										
(kPa)	***(m/s)***	**15**	**20**	**25**	**32**	**40**	**50**	**65**	**80**	**100**	**125**	**150**
		Diâmetro interno *(mm)*										
		15,8	**20,9**	**26,6**	**35**	**40,9**	**52,5**	**62,7**	**77,9**	**102,3**	**128,2**	**154,1**
40	15	9	15	24	42	57	95	135	208	359	564	815
	25	**14**	**25**	**41**	**70**	**96**	**158**	**225**	**347**	**598**	**940**	**1358**
	40	23	40	65	112	153	252	360	555	958	1504	2173
50	15	9	16	26	45	61	101	144	222	383	602	869
	25	**15**	**27**	**43**	**75**	**102**	**168**	**240**	**370**	**638**	**1003**	**1449**
	40	24	43	69	120	163	269	384	592	1021	1604	2318
70	15	10	18	29	51	69	113	162	250	431	676	977
	25	**17**	**30**	**49**	**84**	**115**	**189**	**270**	**416**	**718**	**1127**	**1628**
	40	27	48	78	135	184	302	431	666	1148	1803	2605
90	15	11	20	32	56	76	126	179	277	478	750	1084
	25	**19**	**33**	**54**	**93**	**127**	**210**	**299**	**462**	**796**	**1250**	**1806**
	40	30	53	86	149	204	335	478	738	1274	2000	2890
100	15	12	21	34	59	80	132	188	291	501	787	1137
	25	**20**	**35**	**57**	**98**	**133**	**220**	**314**	**484**	**835**	**1312**	**1895**
	40	32	56	91	157	214	352	502	775	1336	2099	3032
200	15	17	31	50	86	117	193	275	425	733	1151	1663
	25	**29**	**51**	**83**	**143**	**195**	**322**	**459**	**708**	**1221**	**1918**	**2771**
	40	47	82	133	229	312	515	734	1133	1954	3069	4434
300	15	23	40	65	113	153	253	361	557	960	1508	2178
	25	**38**	**67**	**109**	**188**	**256**	**421**	**601**	**928**	**1600**	**2513**	**3631**
	40	61	107	174	300	409	674	962	1485	2560	4021	5809
400	15	28	50	80	139	189	312	445	687	1185	1860	2688
	25	**47**	**83**	**134**	**232**	**316**	**520**	**742**	**1145**	**1974**	**3101**	**4480**
	40	75	132	214	371	505	832	1187	1832	3159	4961	7168
500	15	34	59	95	165	225	371	529	816	1407	2210	3193
	25	**56**	**98**	**159**	**275**	**375**	**618**	**881**	**1360**	**2345**	**3683**	**5321**
	40	90	157	254	440	600	988	1409	2176	3752	5892	8514
600	**15**	39	68	**110**	191	260	429	611	944	1628	2556	3693
	25	**65**	**114**	**184**	**318**	**434**	**714**	**1019**	**1573**	**2713**	**4260**	**6155**
	40	104	182	294	509	694	1143	1630	2517	4340	6816	9848
700	15	44	77	125	217	295	487	694	1071	1847	2901	4192
	25	**73**	**129**	**209**	**361**	**492**	**811**	**1157**	**1785**	**3079**	**4835**	**6986**
	40	118	206	334	578	787	1297	1851	2856	4926	7736	11178
800	15	49	86	140	242	330	544	776	1198	2066	3245	4688
	25	**82**	**144**	**234**	**404**	**550**	**907**	**1294**	**1997**	**3444**	**5408**	**7814**
	40	131	231	374	646	881	1451	2070	3195	5510	8653	12502
1000	15	60	105	170	294	400	659	940	1451	2502	3930	5678
	25	**99**	**175**	**283**	**489**	**667**	**1098**	**1567**	**2418**	**4171**	**6550**	**9464**
	40	159	279	453	783	1067	1758	2507	3869	6673	10480	15142
1400	15	80	141	229	396	539	888	1266	1955	3371	5295	7650
	25	**134**	**235**	**381**	**659**	**898**	**1480**	**2111**	**3258**	**5619**	**8825**	**12750**
	40	214	376	610	1055	1437	2368	3377	5213	8991	14119	2040

Gráfico para dimensionamento de tubulação de vapor para velocidade genérica

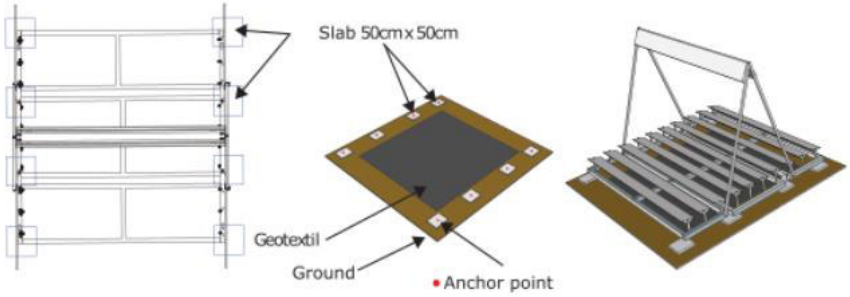


Módulo de Concentrador Linear Fresnel (*SOLATOM*)





Field support



Deployment process

