

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
NÍVEL MESTRADO**

DIEGO RAMOS MOREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DE TESTES PARA AVALIAÇÃO DO
DESEMPENHO TÉRMICO DE UM CONCENTRADOR FRESNEL LINEAR**

São Leopoldo, maio de 2019

Diego Ramos Moreira

DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DE TESTES PARA AVALIAÇÃO DO
DESEMPENHO TÉRMICO DE UM CONCENTRADOR FRESNEL LINEAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, como pré-requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Jacqueline Biancon Copetti (PPGEM – Unisinos)

Prof. Dr. João Batista Dias (PPGEM – Unisinos)

Prof. Dr. Arno Krenzinger (PROMEC – UFRGS)

São Leopoldo, maio de 2019

M838d Moreira, Diego Ramos.
 Desenvolvimento de uma bancada de testes para avaliação
do desempenho térmico de um concentrador Fresnel linear /
Diego Ramos Moreira. – 2019.
 94 f. : il. ; 30 cm.

 Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos
Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
2019.

 “Orientador: Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan.”

 1. Refletor Fresnel linear. 2. Desempenho térmico. 3. Energia
solar concentrada. I. Título.

CDU 621

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Amanda Schuster – CRB 10/2517)

Dedico este trabalho à Deus.

Aos meus pais, José Carlos e Cristina.

Aos meus irmãos Alexandra, Cristiano e Diogo.

À minha esposa Tiana.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan, pela orientação, pela dedicação na construção deste trabalho e pelos conhecimentos transmitidos sem os quais esta dissertação não seria possível.

Ao colega Álvaro Daniel de Oliveira e ao Jônatas Mathias Ledur Schimitz pelo apoio na construção da bancada de testes e nos ensaios realizados.

Aos colegas do PPG em Engenharia Mecânica da Unisinos.

À Capes pela bolsa de mestrado.

A todos que de alguma forma contribuíram para elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS A CAPES

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

"Solar power is not about fashion, it's about survival" Norman Foster

RESUMO

Entre os concentradores, os refletores Fresnel lineares (*Linear Fresnel Reflector* - LFR) tornaram-se uma tecnologia atrativa para o aproveitamento da energia solar, pois são adequados para serem utilizados em sistemas de aquecimento ou arrefecimento de edifícios, aquecimento de água doméstica e geração de vapor para indústrias. Para o desenvolvimento e estabelecimento de concentradores solares térmicos é de grande importância a realização de testes de desempenho. Como as normas existentes priorizam os testes para coletores solares planos e apresentam limitações técnicas nos métodos estabelecidos para a análise de desempenho térmico de concentradores, o desenvolvimento de procedimentos de ensaio se torna necessário, especialmente para caracterizar seu desempenho óptico ao longo do ano. Desta forma, o objetivo principal deste estudo é a desenvolvimento de uma bancada de testes para determinar experimentalmente o desempenho térmico de um concentrador Fresnel linear. O refletor construído e utilizado como protótipo de testes contém 14 fileiras de espelhos de 300 mm de largura e 6 m de comprimento, com um concentrador secundário do tipo cavidade com 300 mm de abertura e situado a 3 m de altura, em relação ao plano contendo os eixos dos espelhos. Realizou-se a análise de metodologias e normativas existentes para determinar o desempenho de concentradores solares. Com base nas normas existentes, definiu-se a metodologia de ensaio e equipamentos necessários para a realização dos testes. Foi construído um sistema de recirculação do óleo térmico com controle de vazão e temperatura, com o objetivo de atender as exigências das normas existentes. Como resultado dos ensaios, obteve-se o tempo de resposta do LFR e a eficiência do coletor. A eficiência máxima obtida aproximou-se de 30% e a potência máxima atingida foi de 6,25 kW. A análise óptica indicou perdas finais extremamente elevadas em 21 de junho, pois somente 30% do absorvedor recebeu os raios refletidos pelos espelhos.

Palavras-chave: Refletor Fresnel linear. Desempenho térmico. Energia solar concentrada.

ABSTRACT

Among concentrators, linear Fresnel reflectors (LFR) have become an attractive solar power technology for being suitable for use in heating and cooling systems of buildings, domestic water heating and steam generation for industries. Conduction of performance tests is of great importance for the development and establishment of thermal solar concentrators. Existing standards prioritize testing for flat solar reflectors and show technical limitations in established methods for thermal performance analyses of concentrators. In this way, the development of test procedures is necessary, especially to characterize their linear optical performance throughout the year. Thus, the main purpose of this study is the development a test bench to experimentally, determine the thermal performance of a linear Fresnel concentrator. The collector used contains 14 rows of mirrors of 300 mm wide each, with a secondary concentrator with an opening of 300 mm, located 3 m high in relation to the plane containing the axes of the mirrors. Analyzes of existing methodologies and regulations were conducted to determine the performance of solar concentrators. Based on the existing standards, the test methodology and the necessary equipment to conduct the tests were defined. As a result of the tests, the collector efficiency curve and its performance parameters were obtained. The maximum efficiency approached 30% and maximum power reached was 6.25 kW. The optical analysis indicated the extremely high final losses on June 21, as only 30% of the absorber received the rays reflected by the mirrors.

Key words: Linear Fresnel reflector. Thermal performance. Concentrated Solar Power.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa mundial de radiação solar direta.....	19
Figura 2.1 - Relações entre a Terra e o Sol.	23
Figura 2.2 - Formas de aproveitamento da energia solar.	24
Figura 2.3 - Variação da Irradiação durante o ano para diversas latitudes.....	25
Figura 2.4 - Potência instalada em usinas solares de concentração entre 2007 e 2017.....	27
Figura 2.5 - Potência instalada em usinas solares de concentração entre 2005 e 2015.....	27
Figura 2.6 - Esquemas de funcionamento de usinas heliotérmicas.	28
Figura 2.7 - Ilustração do funcionamento de um concentrador do tipo calha parabólica.....	29
Figura 2.8 - Ilustração de um concentrador do tipo torre solar.	30
Figura 2.9 - Ilustração de um concentrador do tipo disco parabólico.	30
Figura 2.10 - Aspecto de um refletor Fresnel linear.....	31
Figura 2.11 - Desenho do refletor Fresnel patenteado e fotos do primeiro protótipo.	31
Figura 3.1 - Comparação da concentração da radiação entre o coletor parabólico e o coletor Fresnel linear.	33
Figura 3.2- Exemplo de refletor Fresnel linear e seus componentes.....	34
Figura 3.3 - Energia térmica em função do número de espelhos.	35
Figura 3.4 - Energia térmica em função do espaçamento entre os espelhos.	35
Figura 3.5 - Configurações mais usuais de receptores usadas em coletores Fresnel lineares. .	38
Figura 3.6 - Curvas de eficiência para coletor com absorvedores revestidos com superfície pintada de preto e com superfície seletiva, com razão de concentração, C , de 9,4.....	40
Figura 3.7 - Tipos de configuração do receptor de um LFR.	41
Figura 3.8 - Tipos de sistemas de rastreamento.....	43
Figura 3.9 - Vista frontal de tipos de estrutura de coletor e suporte do receptor.	44
Figura 4.1 - Curva de típicas de desempenho do coletor.....	45
Figura 4.2 - Curvas do modificador do ângulo de incidência transversal e longitudinal de um LFR.....	46
Figura 4.3 – Ilustração das perdas finais de linha no absorvedor.....	48
Figura 4.4 - Efeitos das perdas de final de linha no rendimento de um LFR: a) para diferentes comprimentos do coletor; b) para diferentes comprimentos e ângulo de zênite.	48
Figura 4.5 - Variação da perda de final de linha ao longo do ano.....	49
Figura 4.6 - Variação da perda de final de linha com a latitude para diferentes comprimentos de receptor.	50

Figura 4.7 - Efeitos de sombreamento e bloqueio entre os refletores.	50
Figura 4.8- Parâmetros geométricos característicos do coletor.	51
Figura 5.1 - Curva de desempenho do concentrador estudado por Jaramillo et al. (2015).	54
Figura 5.2 - Modelo 3D do coletor LFR e detalhe do absorvedor com cavidade triangular.	54
Figura 5.3 - Curva de eficiência térmica do LFR obtida por Song et al. (2015).	55
Figura 5.4 - Protótipo de coletor Fresnel estudado por Beltagy et al.(2017).	56
Figura 6.1 - Fluxograma da metodologia a ser utilizada.	57
Figura 6.2 - Esquema da bancada de testes.	59
Figura 6.3 - Localização do concentrador no campus da Unisinos.	59
Figura 6.4 - Dimensões do campo de espelhos do concentrador.	60
Figura 6.5 – Bancada utilizada para flexionar os espelhos do LFR.	61
Figura 6.6 - Fileiras de espelhos instalados através da estrutura de sustentação.	61
Figura 6.7 - Dimensões do receptor do tipo cavidade e dos tubos de aço.	62
Figura 6.8 - Receptor (a) e tubos do absorvedor (b).	62
Figura 6.9 - Diagrama de blocos dos componentes do sistema de rastreamento solar.	63
Figura 6.10 - Sistema de movimentação dos espelhos.	64
Figura 6.11 - Sensor de inclinação.	64
Figura 6.12 - Sistema de controle de temperatura do fluido.	65
Figura 6.13 – Trocador de calor de placas do sistema de refrigeração do fluido térmico.	66
Figura 6.14 – Trocador de calor a ar, com dois ventiladores axiais do sistema de refrigeração da água de circulação.	66
Figura 6.15 - Controlador PID e relé de estado sólido.	67
Figura 6.16 – Equipamentos do sistema de controle de vazão do fluido de trabalho	67
Figura 6.17 - Medidores de vazão utilizados na bancada de testes.	68
Figura 6.18 - Sensores de temperatura instalados na entrada e saída do absorvedor.	69
Figura 6.19 – Equipamentos de medição de radiação da estação meteorológica.	70
Figura 6.20 - Unidade de aquisição e registro de dados e computador utilizados nos testes.	71
Figura 6.21 - Ilustração da relação dos ângulos e os planos do concentrador.	76
Figura 6.22 - Aspecto do programa Tonatiuh com a definição da geometria do LFR.	78
Figura 6.23 – Configuração dos parâmetros ópticos dos espelhos.	79
Figura 7.1– Fileira de espelhos montada com a estrutura de suporte (esquerda) e a radiação refletida por uma fileira de espelhos (direita).	80
Figura 7.2 - Tempo de resposta do refletor Fresnel linear ensaiado.	81

Figura 7.3 – Variação das temperatura de entrada e saída do LFR operando sem o sistema de controle de temperatura.	82
Figura 7.4 – Eficiência instantânea do LFR operando sem o sistema de controle de temperatura e a irradiância solar direta normal (G_{bN}).	82
Figura 7.5 – Variação da temperatura de entrada do absorvedor e a irradiância solar direta normal.	83
Figura 7.6 - Curva de eficiência do LFR.	84
Figura 7.7 - Temperaturas de entrada e saída no absorvedor.	84
Figura 7.8 - Curva do modificador de ângulo de incidência longitudinal (IAM_L) determinada com o software Tonatiuh.	85
Figura 7.9 - Curva do modificador de ângulo de incidência transversal (IAM_T) determinada com o software Tonatiuh.	85
Figura 7.10 - Modificador de ângulo de incidência para três dias diferentes (21 de Março, 21 de Junho e 21 de dezembro).	86
Figura 7.11 - Distribuição do fluxo no plano do absorvedor para o dia 21 de dezembro (a) e 21 de junho (b), às 12 horas.	87
Figura 7.12 –Parte do absorvedor não iluminado pela radiação refletida pelos espelhos no dia 09 de abril.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos de coletores solares.....	26
Tabela 2.2 - Primeiras plantas de concentração solar na década de 80.	26
Tabela 3.1 – Comparação das geometrias dos espelhos.....	38
Tabela 5.1 - Comparação da eficiência térmica de protótipos de LFR.	56
Tabela 6.1 – Características dos equipamentos de medição conforme as normas de ensaio. ..	58
Tabela 6.2 - Principais propriedades do fluido de transferência de calor Paratherm HE.....	68
Tabela 6.3 - Resumo dos sensores da estação meteorológica.	70

LISTA DE SIGLAS

ANSI	<i>American National Standard Institute</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CC	Ciclo Combinado
CPC	Coletor Parabólico Composto
CSLFC	<i>Compact Linear Fresnel Collector (Coletor Fresnel Linear Compacto)</i>
CSP	<i>Concentrated Solar Power</i>
DNI	<i>Direct Normal Irradiance</i>
DOE	<i>Department of Energy</i>
HTF	<i>Heat Transfer Fluid</i>
IAM	<i>Incident Angle Modifier</i>
ISCC	<i>Integrated Solar Combined Cycle System</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LFC	<i>Linear Fresnel Concentrated</i>
LFR	<i>Linear Fresnel Reflector</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
P&D	Pesquisa & Desenvolvimento

LISTA DE SIMBOLOS

Nomenclatura

A_a	Área de abertura do coletor [m ²]
C	Razão de concentração
C_p	Calor específico [J/kg °C]
f	Distância focal do coletor [m]
F_R	Fator de remoção de calor [-]
G	Irradiância [W/m ²]
G_b	Irradiância solar direta [W/m ²]
G_{bN}	Irradiância solar direta normal [W/m ²]
G_D	Irradiância solar difusa [W/m ²]
G_T	Irradiância solar total [W/m ²]
H	Distância dos espelhos ao receptor [m]
$K(\theta_L)$	Modificador ângulo de incidência em relação ao plano longitudinal [-]
$K(\theta_T)$	Modificador ângulo de incidência em relação ao plano transversal [-]
K_B	Modificador ângulo de incidência bidimensional [-]
L_a	Comprimento de abertura do absorvedor [m]
L_c	Comprimento de abertura do coletor [m]
L_e	Comprimento dos espelhos [m]
L_r	Comprimento de abertura do receptor [m]
\dot{m}	Vazão mássica [kg/s]
N	Número de medições [-]
n_e	Número de espelhos [-]
\dot{Q}	Taxa de ganho de calor no absorvedor [W]
q_{inc}	Taxa de radiação incidente no concentrador [W]
T_{fe}	Temperatura do fluido de transferência de calor na entrada do coletor [°C]
T_{fs}	Temperatura do fluido de transferência de calor na saída do coletor [°C]
U_L	Coefficiente global de transferência de calor do coletor [W/m ² K]
W_a	Largura de abertura do absorvedor [m]
W_c	Largura de abertura do coletor [m]

W_e Largura dos espelhos [m]

Símbolos Gregos

α Absortividade [-]

α_s Ângulo de altitude solar [°]

ΔT_a Diferença de temperatura entre a entrada e a saída do absorvedor [°C]

$\Delta T_{a,f}$ Diferença de temperatura entre a entrada e a saída do absorvedor no momento em que são atingidas as condições finais do regime quase estacionário [°C]

$\Delta T_{a,t}$ Diferença de temperatura entre a entrada e a saída do absorvedor no tempo t . [°C]

γ_s Ângulo de azimute solar [°]

η Eficiência térmica [%]

η_{end} Fator de perdas finais [-]

η_o Eficiência óptica do coletor [-]

ρ Ângulo de incidência solar [°]

τ Transmitância [-]

θ Ângulo de incidência [°]

θ_L Ângulo de incidência longitudinal [°]

θ_n Ângulo de inclinação do espelho de número n [°]

θ_T Ângulo de incidência transversal [°]

θ_Z Ângulo de zênite [°]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 OBJETIVOS.....	20
1.2 OBJETIVO GERAL.....	20
1.2.1 Objetivos Específicos.....	20
1.3 JUSTIFICATIVA.....	20
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	22
2 ENERGIA SOLAR.....	23
2.1 RADIAÇÃO SOLAR.....	24
2.2 COLETORES DE ENERGIA SOLAR.....	25
2.3 CONCENTRADORES SOLARES.....	26
2.3.1 Calha Parabólica.....	29
2.3.2 Torre Solar.....	29
2.3.3 Disco Parabólico.....	30
2.3.4 Refletor Fresnel linear.....	30
3 COMPONENTES DE UM CONCENTRADOR FRESNEL LINEAR.....	33
3.1 ESPELHOS REFLETORES.....	33
3.2 RECEPTOR.....	38
3.3 FLUIDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	41
3.4 SISTEMA DE RASTREAMENTO DO SOL.....	42
3.5 ESTRUTURA.....	43
4 DESEMPENHO TÉRMICO.....	45
4.1 PERDAS ÓPTICAS.....	47
4.1.1 Perdas de Final de Linha.....	47
4.1.2 Bloqueio e Sombreamento.....	50
4.2 ENSAIOS.....	52
4.2.1 Modelo Estacionário.....	52
4.2.2 Modelo Quase Dinâmico.....	52
5 ESTADO DA ARTE.....	54
6 METODOLOGIA.....	57
6.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	57
6.2 MONTAGEM E INSTALAÇÃO.....	58
6.2.1 Espelhos.....	59

6.2.2 Receptor	61
6.2.3 Sistema de Rastreamento Solar	63
6.2.3.1 Motor de passo.....	63
6.2.3.2 Medição de ângulo.....	64
6.2.4 Sistema de Controle de Temperatura.....	65
6.2.5 Controle e Medição de Vazão.....	67
6.2.6 Fluido de transferência de calor	68
6.2.7 Sensores de temperatura	69
6.2.8 Estação meteorológica.....	69
6.2.9 Unidade de Aquisição e Registro de Dados.....	70
6.3 MÉTODOS DE ENSAIO	71
6.3.1 Tempo de Resposta.....	72
6.3.2 Modificador de Ângulo de Incidência	73
6.4 CÁLCULOS	73
6.4.1 Tempo de Resposta.....	73
6.4.2 Ângulo de Incidência.....	74
6.4.3 Taxa de Radiação Incidente no Concentrador	74
6.4.4 Taxa de Transferência de Calor para o Fluido	74
6.4.5 Modificador do Ângulo de Incidência	75
6.5 SIMULAÇÃO	77
6.5.1 Definição do Formato do Sol.....	77
6.5.2 Geometria.....	77
6.5.3 Qualidade Óptica	78
6.5.4 Simulação	79
7 RESULTADOS	80
7.1 PERFIL DA RADIAÇÃO REFLETIDA PELOS ESPELHOS	80
7.2 TEMPO DE RESPOSTA	80
7.3 LFR SEM O CONTROLE DE TEMPERATURA	81
7.4 VARIAÇÃO DA VAZÃO DO FLUIDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	83
7.5 CONTROLE DE TEMPERATURA DE ENTRADA	83
7.6 EFICIÊNCIA	83
7.7 MODIFICADOR DE ÂNGULO DE INCIDÊNCIA	84
8 CONCLUSÃO.....	88
8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	90

1 INTRODUÇÃO

A energia é um dos principais recursos utilizados pela sociedade moderna. Em todos os processos de produção, tanto no setor industrial como no de serviços, a energia tem uma participação fundamental. Os processos de conversão e uso de energia são fundamentais para o funcionamento da sociedade. Por outro lado, representam uma das principais fontes de poluição nos dias atuais. O aquecimento global e as mudanças climáticas relacionam-se majoritariamente com a emissão de poluentes atmosféricos e dióxido carbônico, originados principalmente na queima de combustíveis fósseis, utilizados na geração termoelétrica, no transporte e em processos industriais (BORGNAKKE; SONNTAG, 2013).

Outro aspecto marcante do cenário atual é a ampliação significativa do uso de fontes alternativas e renováveis na produção de energia. O crescimento econômico sustentável e o incremento da qualidade de vida só podem ser possíveis com o desenvolvimento e o emprego de novas tecnologias de conversão de energia, assim como do uso racional e eficiente dos recursos energéticos convencionais. Nesse sentido, vale ressaltar o aumento da utilização da energia solar no Brasil: solar fotovoltaica e solar térmica.

Como parte da intensa pesquisa por fontes alternativas de energia limpas e renováveis, a energia solar concentrada (*Concentrated Solar Power* - CSP) está sendo considerada como uma das tecnologias-chave devido ao seu potencial para atender às aplicações de carga de base. A Agência Internacional de Energia (2014) estabeleceu uma meta de capacidade instalada de 980 GW para a tecnologia CSP em 2050. As tecnologias mais comuns CSP incluem concentradores tipo disco, concentrador de calha parabólica, torre central e refletor Fresnel linear. Entre estes, os concentradores tipo calha parabólica são, atualmente, a tecnologia mais utilizada, com mais de 95% das instalações CSP (VIGNAROUBAN et al., 2015).

No entanto, segundo Pereira et al. (2014) o Brasil possui um potencial importante para uso de concentradores solares, com faixas de valores da irradiação direta de incidência normal (DNI) entre 2.200 kWh/(m²ano) a 2.400 kWh/(m²ano), em grande parte no oeste da Bahia, sul do Piauí, norte de Minas Gerais e a região do cerrado nordestino. As regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste apresentam igualmente extensa área com níveis de DNI superiores a 2.000 kWh/(m²ano), limite inferior recomendado para essa tecnologia, conforme pode ser visualizado na Fig. (1.1).

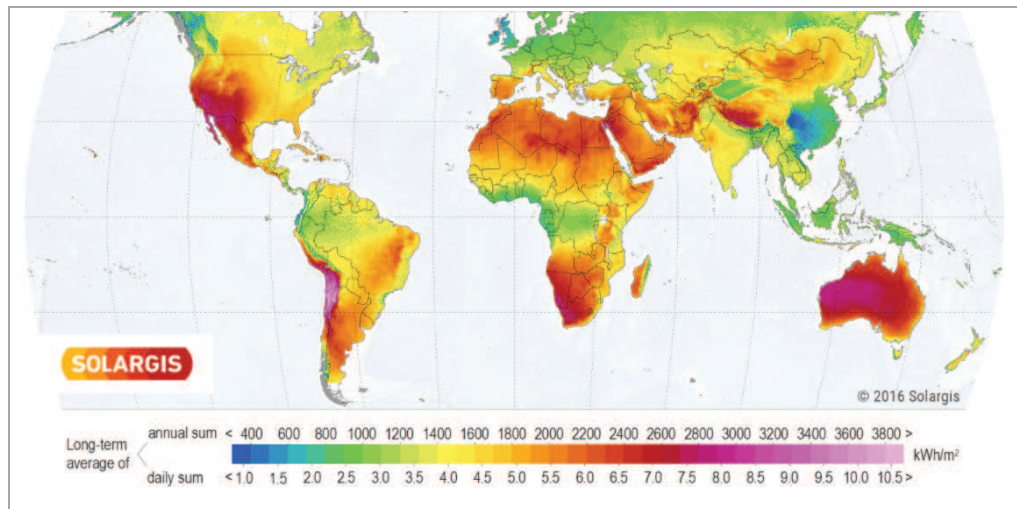


Figura 1.1 - Mapa mundial de radiação solar direta.

Fonte: Solargis (2016).

Porém, a energia térmica de concentração ainda é pouco explorada, pois é uma tecnologia em estado de desenvolvimento. Ainda que países como a Espanha e os Estados Unidos sejam líderes nesta tecnologia, o Brasil tem potencial para estar entre os líderes mundiais, devido aos excelentes índices de radiação solar direta. Assim, pesquisadores brasileiros estão dando os primeiros passos para desenvolver esta tecnologia e trocar conhecimento com projetos internacionais (Heliotérmica, 2018). O setor industrial e o governo estão descobrindo o potencial da tecnologia e começam a dirigir recursos ao desenvolvimento deste mercado. Porém, poucos profissionais estão aptos para projetar ou trabalhar com energia solar de concentração.

Entre os concentradores, os refletores Fresnel lineares (*Linear Fresnel Reflector - LFR*) tornaram-se uma tecnologia atrativa para a energia solar em grande escala. Ao contrário do que ocorre para grandes sistemas LFR, algumas aplicações não necessitam áreas de refletores muito grande, o que oferece uma grande oportunidade para o desenvolvimento de pequenos equipamentos LFR (HONGN et al., 2015). Na verdade, historicamente, um maior número de LFR foi desenvolvido para a geração de calor a baixa ou média temperatura (ZHU, 2014). Por exemplo, sistemas em pequena escala operando entre 150 a 300 °C são adequados para serem utilizados em sistemas de aquecimento ou arrefecimento de edifícios, aquecimento de água doméstica, geração de vapor para a mineração, indústrias têxteis e químicas. Hongn et al. (2015) ressaltam que a grande variedade de aplicações possíveis de pequenos sistemas é promissora, mas são necessárias mais pesquisas para caracterizar seu desempenho óptico ao longo do ano.

Diversos desenhos destes refletores têm sido analisados e propostos e alguns deles saíram para o projeto de engenharia e à prototipagem. No entanto, em comparação com os concentradores tipo calha parabólica e de torre central, a tecnologia Fresnel linear tem muitos aspectos técnicos e econômicos que não foram ainda totalmente compreendidos e explorados (ZHU, 2014). Para o desenvolvimento e estabelecimento de concentradores solares térmicos é de grande importância a realização de testes de desempenho confiáveis e que possibilitem realizar comparações entre as várias alternativas apresentadas.

Neste contexto, esta dissertação busca apresentar o desenvolvimento e instalação de uma bancada experimental para testes de desempenho térmico de um refletor Fresnel linear e os resultados obtidos.

1.1 OBJETIVOS

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste estudo é a montagem de uma bancada de testes para determinar, experimentalmente, o desempenho térmico de um concentrador Fresnel linear.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Selecionar e instalar os equipamentos de medição a partir das recomendações das normas de testes de concentradores solares;
- Testar o sistema de resfriamento/aquecimento da bancada para atender às condições de estado quase estacionário;
- Determinar a eficiência do concentrador no período de testes;
- Determinar a variação do modificador do ângulo de incidência através de simulação.

1.3 JUSTIFICATIVA

Para o desenvolvimento de coletores solares térmicos de concentração, testes e avaliações de desempenho confiáveis são de grande importância. Para garantir um teste de desempenho consistente na área de coletores, é necessário seguir os padrões de testes internacionais amplamente utilizados. As características dos diferentes métodos de teste de

estado estacionário, quase dinâmicos e totalmente dinâmicos e apresenta os avanços, bem como as limitações dos procedimentos de avaliação.

Hofer (2016), salienta que os procedimentos de avaliação focados em medições “in-situ” em campos solares ou coletores são escassos e complexos, bem como uma avaliação de coletores lineares de Fresnel ou outros sistemas que operam com meios de transferência de calor não comuns, como sais fundidos e vapor direto. Diante disso, é necessário o desenvolvimento de uma bancada de teste para o desenvolvimento de coletores solares térmicos do tipo Fresnel linear e para pesquisa e desenvolvimento de metodologias de testes específicas para este tipo de concentrador. Para isso, deve-se utilizar equipamentos de medição a partir das recomendações das normas de testes de concentradores solares.

O método estacionário requer que o desvio da temperatura média medida não varie mais que ± 1 °C. Para realizar o ensaio cumprindo as exigências da norma ANSI/ASHRAE 93 quanto à estabilidade da temperatura do fluido na entrada do concentrador é importante utilizar um sistema de controle que mantenha a temperatura do fluido constante. Para isso é necessário a instalação de um sistema de resfriamento/aquecimento da bancada para atender às condições de estado quase estacionário.

Teoricamente, os espelhos de um refletor Fresnel linear (LFR) podem ser planos, uma vez que sua função é refletir a radiação incidente até o absorvedor, situado a uma determinada altura em relação ao plano dos espelhos. Porém, estudos demonstraram como o uso de espelhos curvos pode melhorar o desempenho óptico e reduzir o tamanho do receptor necessário. Diante disso, é necessário verificar a eficiência óptica da curvatura dos espelhos bem como a eficiência térmica do concentrador no período de testes.

Yanga et al. (2015) salientam que atualmente vários estudos estão em andamento no que diz respeito ao número mínimo de dias de medição e tamanho de passo de ângulo máximo para o IAM para ser capaz de determinar os parâmetros térmicos e ópticos de forma confiável, que permita uma previsão precisa do rendimento anual. Uma análise completa do comportamento do IAM geralmente pode ser obtida por uma coleta contínua de dados de 6 a 12 meses de operação. Como o período de teste é limitado, não permite a caracterização completa do desempenho e a avaliação do comportamento anual. Dessa forma, a variação do IAM será determinada através de simulação utilizando o Método Monte Carlo.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

O capítulo 2 apresenta uma breve contextualização sobre a energia solar, fonte de energia utilizada neste trabalho.

O capítulo 3 aborda as principais tecnologias utilizadas nos componentes para a construção de concentradores Fresnel lineares.

O capítulo 4 apresenta a teoria de desempenho térmico em concentradores solares.

O capítulo 5 examina as publicações científicas relacionadas a ensaios experimentais e análises de coletores Fresnel lineares.

O capítulo 6 apresenta a metodologia que será utilizada no trabalho, bem como as características dos equipamentos que constituirão a bancada de testes.

O capítulo 7 apresenta os resultados dos testes de ensaio do concentrador Fresnel linear e os resultados das simulações realizadas com o programa Tonatiuh.

O capítulo 8 apresenta as conclusões do trabalho e as sugestões para sua continuidade.

2 ENERGIA SOLAR

O Sol é uma esfera de matéria gasosa extremamente quente com um diâmetro de $1,39 \times 10^9$ m e está, em média, $1,5 \times 10^{11}$ m da Terra (DUFFIE; BECKMAN, 2013). A Fig. (2.1) apresenta as relações geométricas entre a Terra e o Sol. A energia emitida pelo Sol em forma de radiação eletromagnética ocorre a uma taxa extremamente grande e relativamente constante, 24 horas por dia, 365 dias do ano. Esta taxa é equivalente à energia proveniente de um corpo negro a uma temperatura de cerca de 6000 K.

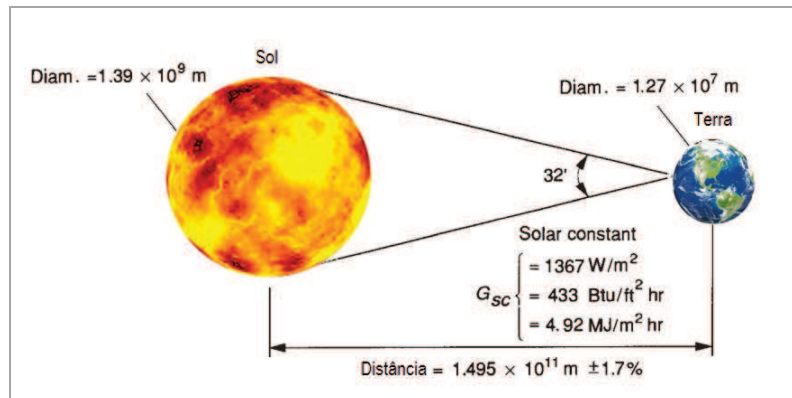


Figura 2.1 - Relações entre a Terra e o Sol.

Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (2013).

A radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica e/ou elétrica. Pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, por meio de efeitos sobre determinados materiais, entre os quais se destacam o termoelétrico e o fotovoltaico. A Fig. (2.2) apresenta as principais formas de aproveitamento da energia solar, isto é, que podem ser divididas em passiva e ativa.

O aproveitamento da iluminação natural e do calor para aquecimento de ambientes, denominado aquecimento solar passivo, decorre da penetração ou absorção da radiação solar nas edificações, reduzindo-se com isso, as necessidades de iluminação e aquecimento. O aproveitamento ativo da energia solar é o que ocorre em aplicações heliotérmicas, fotovoltaicas e solar térmica.

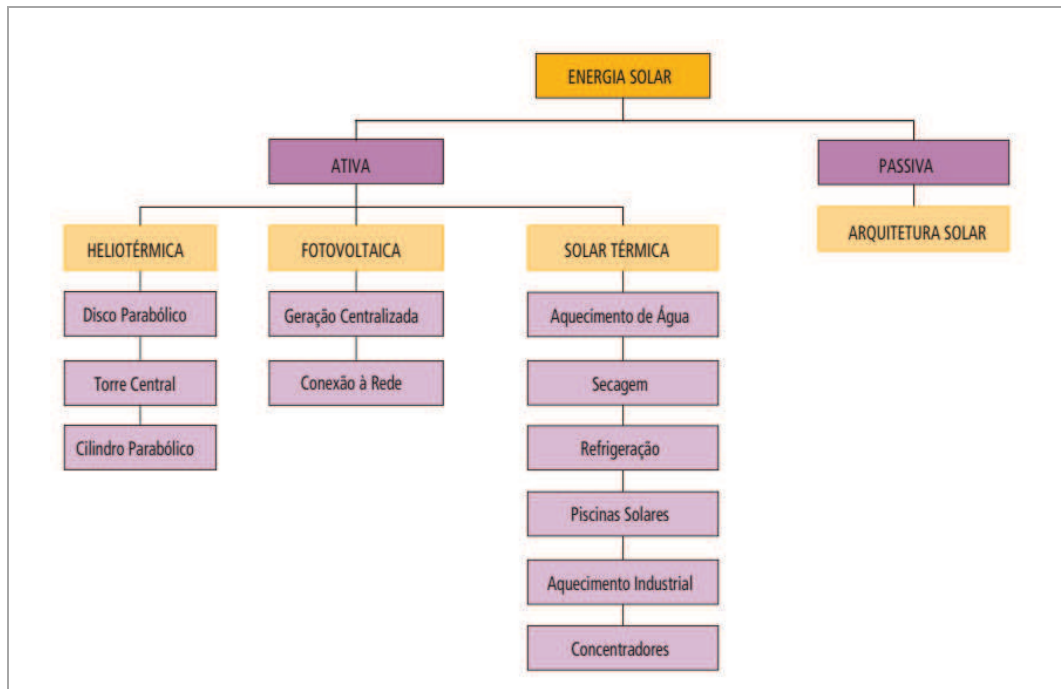


Figura 2.2 - Formas de aproveitamento da energia solar.

Fonte: Pereira et al. (2014).

2.1 RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar que atinge a superfície terrestre pode ser decomposta em radiação direta e difusa. No plano horizontal, a radiação global consiste na soma das componentes direta e difusa, enquanto que em um plano inclinado, além das duas componentes já citadas, é acrescida de uma parcela que é refletida pelas superfícies e elementos do entorno.

Além das condições atmosféricas (nebulosidade, umidade relativa do ar, etc.), a disponibilidade de radiação solar, também denominada energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende da latitude local e da posição no tempo (hora do dia e dia do ano). Isso se deve à inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira diariamente (movimento de rotação) e à trajetória elíptica que a Terra descreve ao redor do Sol (translação ou revolução). Desse modo, a duração solar do dia varia. Em algumas regiões e períodos do ano as variações são mais intensas, como nas regiões polares e também nos períodos de solstício. O inverso ocorre próximo à linha do equador e durante os equinócios.

As regiões próximas à linha do equador apresentam menor variação da irradiação ao longo do ano, enquanto localidades em grandes latitudes apresentam os maiores valores de irradiação em meses do verão, mas durante o inverno apresentam os menores, de modo que a energia anual total recebida seja menor nas maiores latitudes (TOLMASQUIM, 2016). A Fig. (2.3) ilustra a variação da irradiação durante o ano para diversas latitudes.

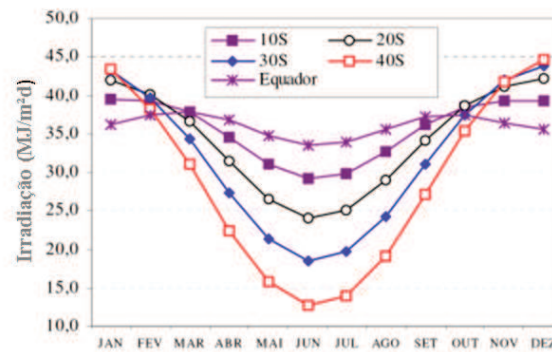


Figura 2.3 - Variação da Irradiação durante o ano para diversas latitudes

Fonte: Tolmasquim (2016).

2.2 COLETORES DE ENERGIA SOLAR

O coletor de energia solar é um tipo especial de trocador de calor que transforma a energia da radiação solar em energia interna do meio de transporte. O componente principal de um sistema solar é o coletor solar. É um dispositivo que absorve a radiação solar incidente, converte-a em calor e transfere esse calor para um fluido (normalmente ar, água ou óleo) que flui através do coletor (KALOGIROU, 2004).

Existem basicamente dois tipos de coletores solares: não concentradores ou estacionários e concentradores. Um coletor não concentrador tem a área similar para interceptar e absorver a radiação solar, enquanto que um coletor solar concentrador, com sistema de rastreamento solar, geralmente tem superfícies refletoras (coletores) para interceptar e focar a radiação solar para uma área de recepção menor (absorvedor), aumentando assim o fluxo de radiação. Um grande número de coletores solares está disponível no mercado. Uma lista resumida é mostrada na Tab. (2.1) com as principais características: tipo de absorvedor, razão de concentração e faixa de temperaturas.

Tabela 2.1 - Tipos de coletores solares.

Movimento	Tipo de coletor	Tipo de absorvedor	Razão de concentração	Faixa de temperaturas (°C)
Estacionário	Coletor de placa plana	Plano	1	30 – 80
	Coletor de tubo evacuado	Plano	1	50 – 200
	Coletor parabólico composto	Tubular	1-5	60 – 240
Rastreamento de eixo único	Refletor Fresnel linear	Tubular	10 - 40	60 – 250
	Coletor de calha parabólica	Tubular	15-45	60 – 300
	Concentrador de calha cilíndrica	Tubular	10 - 50	60 – 300
Rastreamento de eixo único	Disco parabólico	Pontual	100-1000	100 - 1500
	Torre solar	Pontual	100-1500	150-2000

Fonte: Kalogirou (2004).

2.3 CONCENTRADORES SOLARES

A energia solar concentrada (*Concentrated solar power - CSP*) é uma tecnologia promissora para a conversão de energia solar. As primeiras plantas de CSP de grande escala foram construídas por volta de 1980, e são ilustradas na Tab. (2.2). Segundo Brakmann (2005), muitas dessas plantas-piloto não conseguiram atingir os níveis de desempenho esperados. Nas décadas seguintes, as atividades se concentraram em Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) para melhorias tecnológicas, mas com pouca expansão. No entanto, nos últimos anos, ocorreu um renascimento do CSP, apresentando um aumento significativo da potência instalada, conforme pode ser visualizado na Fig. (2.4), onde a Espanha é a líder em capacidade instalada, com 2,3 GW em 2017 (REN21, 2018).

Tabela 2.2 - Primeiras plantas de concentração solar na década de 80.

Nome	Localização	Tamanho (MWe)	Tipo	Ano de Instalação
Aurelios	Sicília	1,0	Torre	1981
SSPS/CRS	Espanha	0,5	Torre	1981
SSPS/DCS	Espanha	0,5	Parabólico	1981
Sunshine	Japão	1,0	Torre	1981
Solar	Califórnia	10	Torre	1982
Themis	França	2,5	Torre	1982
CESA-1	Espanha	1,0	Torre	1983
MSEE	Estado Unidos	0,75	Torre	1984
SEGS-1	Estado Unidos	14	Torre	1984
Vanguard	Estado Unidos	0,025	Torre	1984
MDA	Estado Unidos	0,025	Torre	1984
C3C-5	Estado Unidos	5,0	Torre	1985

Fonte: Brakmann (2005).

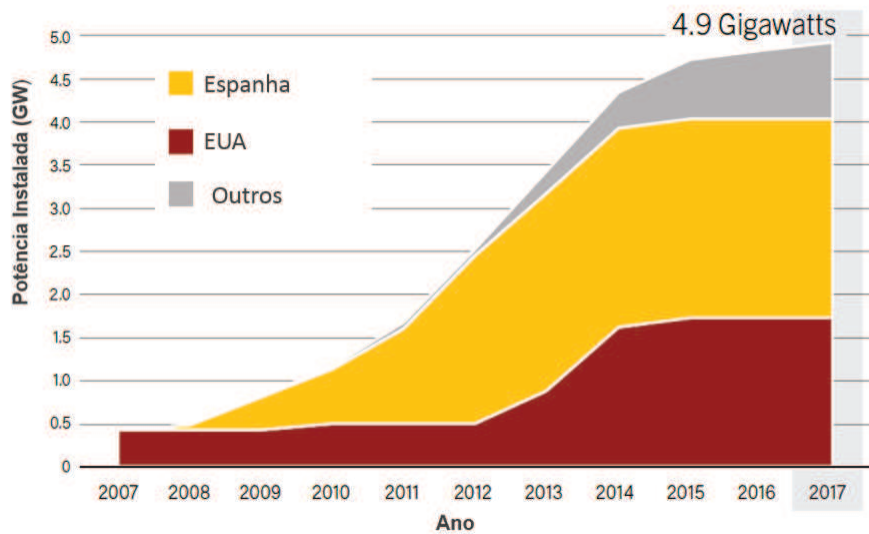


Figura 2.4 - Potência instalada em usinas solares de concentração entre 2007 e 2017.

Fonte: REN21(2018).

Na Fig. (2.5) apresenta-se um panorama atual da potência instalada de sistemas de concentração térmica ao redor do globo, de diferentes tecnologias.

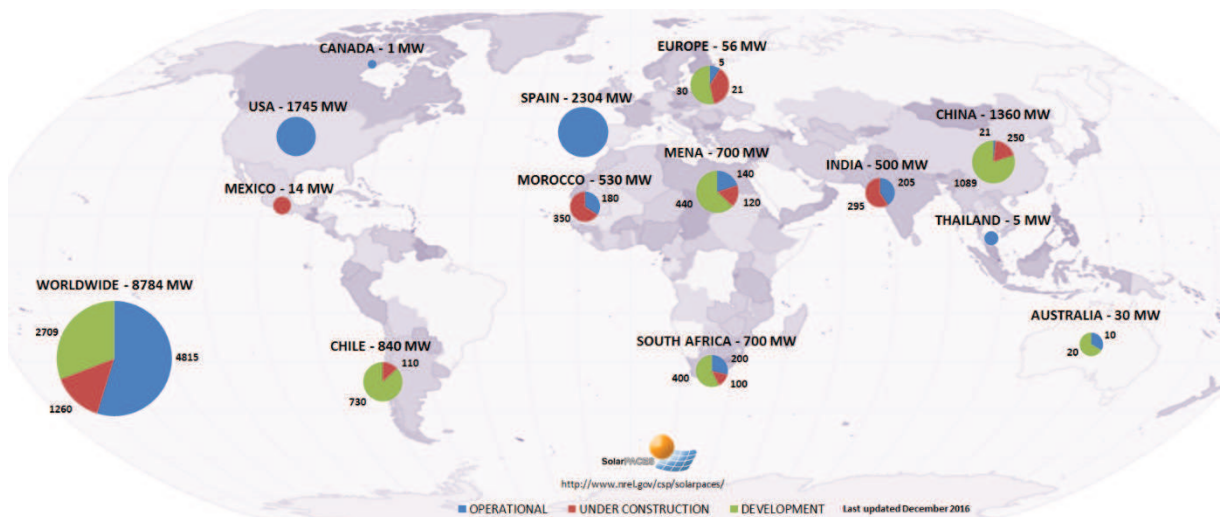


Figura 2.5 - Potência instalada em usinas solares de concentração entre 2005 e 2015.

Fonte: REN21(2016).

Uma instalação de energia solar térmica converte a radiação solar em energia elétrica. Em primeiro lugar, a radiação solar direta é refletida, através de um sistema de concentradores, para um sistema receptor, onde é transformada em energia térmica através de um fluido de trabalho, passando daí para o bloco de potência onde é transformada em trabalho e este em energia elétrica (IDAE, 2011).

Uma CSP pode operar em um formato híbrido, chamado de "Sistema Solar Integrado de Ciclo Combinado" (*Integrated Solar Combined Cycle System - ISCC*). Segundo Souza e Cavalcante (2016), o ISCC é um sistema híbrido típico que integra a energia solar e combustíveis fósseis. O vapor gerado no campo solar alimenta o ciclo de vapor da planta de "ciclo combinado" (CC), aumentando assim a potência da turbina a vapor. Ele pode alcançar eficiências em torno de 67% (10% maior do que uma planta CC convencional). Segundo Pereira et al. (2014), as três plantas ISCC que operam em ciclos combinados com substituição parcial de combustíveis fósseis possuem capacidade instalada de 65 MW e também utilizam a tecnologia das calhas parabólicas. A Fig (2.6) mostra os esquemas de funcionamento de uma usina heliotérmica convencional com armazenamento e uma usina heliotérmica híbrida.

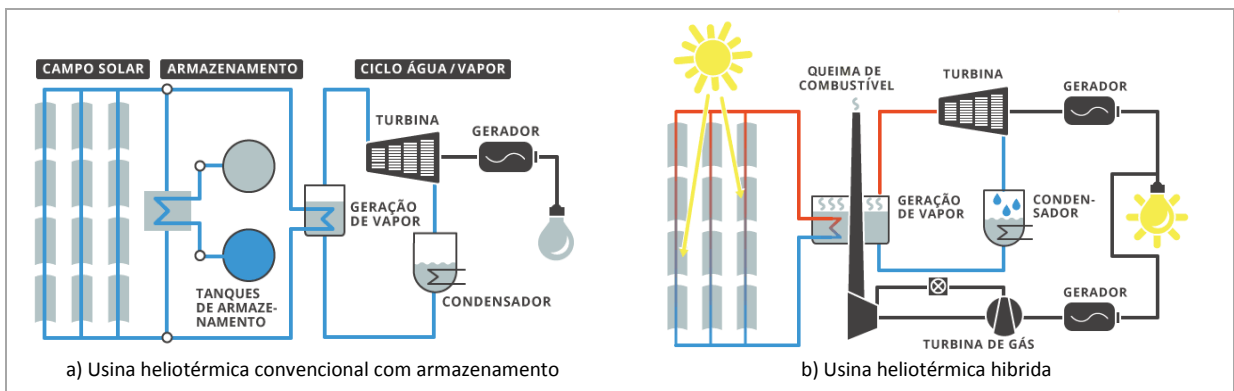


Figura 2.6 - Esquemas de funcionamento de usinas heliotérmicas.

Fonte: Energia Heliotérmica (2018).

Segundo Souza e Cavalcante (2016), muitos estudos indicam uma abordagem de baixo custo para a introdução do CSP na matriz energética de um país através de plantas CSP híbridas para o uso de biomassa, gás ou qualquer outro combustível fóssil. Tal modelo de planta solar iria apresentar um caminho viável para a integração CSP com base no contexto da geração de energia local. Embora haja um problema em relação a disponibilidade da biomassa em locais com alta DNI (*Direct Normal Irradiance*), o Brasil apresenta ótimas condições para projetos de pequena escala na modalidade híbrida.

As quatro tecnologias de concentração são: calhas parabólicas; refletores Fresnel lineares; torres solares e discos parabólicos e serão detalhadas a seguir.

2.3.1 Calha Parabólica

A tecnologia do tipo calha parabólica utiliza refletores parabólicos e côncavos para concentrar a radiação solar em tubos receptores termicamente eficientes colocados na linha focal da calha, conforme é ilustrado na Fig. (2.7). Um fluido de transferência de calor, tal como óleo térmico sintético, é circulado nestes tubos. Aquecido a aproximadamente 400 °C pelos raios solares concentrados, este fluido é então bombeado através de uma série de trocadores de calor para produzir vapor superaquecido. O vapor é convertido em energia elétrica em uma turbina a vapor convencional acoplada a um gerador, que pode ser parte de um ciclo de vapor convencional ou integrado em um ciclo combinado de turbina a vapor e a gás.

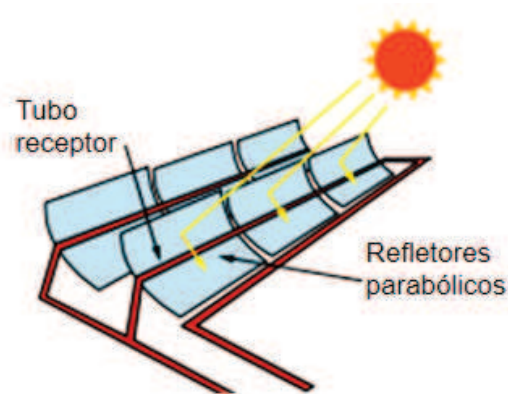


Figura 2.7 - Ilustração do funcionamento de um concentrador do tipo calha parabólica.

Fonte: Adaptado de IDAE (2011)

2.3.2 Torre Solar

A tecnologia do tipo torre solar utiliza um conjunto circular de heliostatos para concentrar a radiação solar em um receptor central montado no topo de uma torre, conforme esquema representado na Fig. (2.8). Um meio de transferência de calor neste receptor central absorve a radiação altamente concentrada refletida pelos heliostatos e converte-a em energia térmica a ser utilizada para a subsequente geração de vapor superaquecido para operação de uma turbina. Atualmente, os meios de transferência de calor utilizados incluem água/vapor, sais fundidos, sódio líquido e ar.

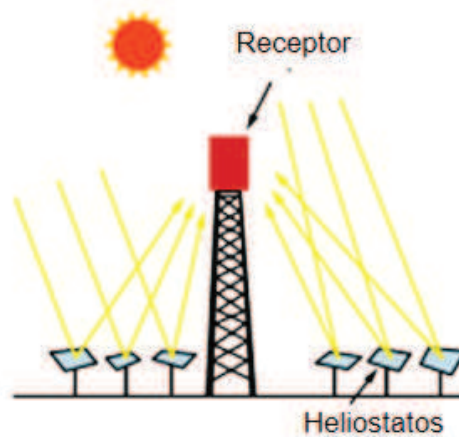


Figura 2.8 - Ilustração de um concentrador do tipo torre solar.

Fonte: Adaptado de IDAE (2011)

2.3.3 Disco Parabólico

A tecnologia do tipo disco parabólico utiliza um refletor em formato parabolóide (disco) para concentrar a radiação solar sobre um receptor localizado no ponto focal do disco, conforme esquema mostrado na Fig. (2.9). Estes concentradores são montados em uma estrutura com um sistema de rastreamento de dois eixos para seguir o Sol. A radiação de feixe concentrado é absorvida no receptor para aquecer um fluido ou gás (ar) até aproximadamente 750 °C. Este fluido é então usado para gerar eletricidade em um pequeno pistão ou motor *Stirling* ou em uma micro turbina, conectada ao receptor.

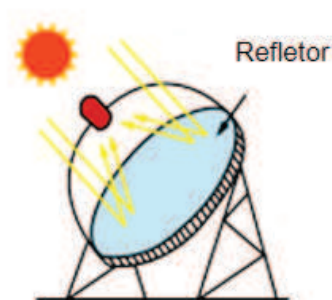


Figura 2.9 - Ilustração de um concentrador do tipo disco parabólico.

Fonte: Adaptado de IDAE (2011)

2.3.4 Refletor Fresnel linear

A tecnologia é também conhecida por LFR (*Linear Fresnel Reflector*) e utiliza longas fileiras de espelhos (refletores) próximos do solo, podendo ser planos ou ligeiramente curvos,

que refletem os raios solares na direção de um receptor linear central, fixado acima do plano de espelhos, conforme esquema representado na Fig. (2.10). Os espelhos são ligeiramente curvos com objetivo de aumentar a concentração ou obter menor tamanho para a mesma concentração e apresentam baixo custo.

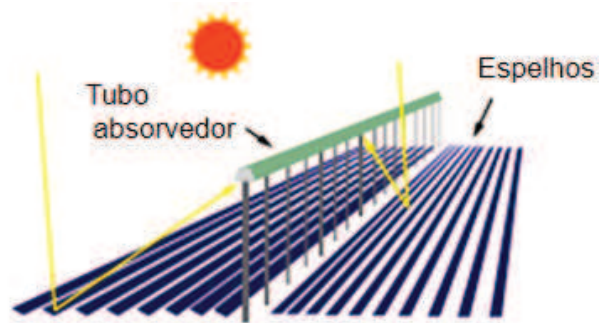


Figura 2.10 - Aspecto de um refletor Fresnel linear.

Fonte: Adaptado de IDAE (2011).

Segundo Silvi (2009), Giovanni Francia foi a primeiro a aplicar o conceito de concentrador refletor Fresnel. Ele registrou sua primeira patente em 1962, na Itália. No ano seguinte, construiu o primeiro protótipo LFR em Génova e, em 1964, montou-o e testou-o na estação solar de Lacédémone-Marselha, em colaboração com Marcel Perrot, e com o apoio do CNRS, NATO e COMPLES (*Coopération Méditerranée pour l'Energie Solaire*). A Fig. (2.11) apresenta o aspecto do desenho da patente de Francia e duas fotos do primeiro protótipo.



Figura 2.11 - Desenho do refletor Fresnel patenteado e fotos do primeiro protótipo.

Fonte: Silvi (2009).

Um relatório financiado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (*Department of Energy - DOE*) na década de 1970 e estudos da tecnologia Fresnel linear indicaram tratar-se de uma tecnologia comercialmente viável. Posteriormente, a tecnologia

atraiu o interesse de todo o mundo. Uma variedade de desenhos destes refletores tem sido analisada, e alguns deles foram construídos e testados. No entanto, em comparação com os de calhas parabólicas, a tecnologia Fresnel linear tem muitos aspectos técnicos e econômicos que não foram ainda totalmente compreendidos e explorados (ZHU, 2014).

3 COMPONENTES DE UM CONCENTRADOR FRESNEL LINEAR

Neste capítulo serão abordados os componentes do concentrador Fresnel linear, apresentando suas características principais e seus impactos no desempenho do coletor.

3.1 ESPELHOS REFLETORES

Os espelhos refletores devem acompanhar o movimento do Sol e concentrar a energia solar em um receptor. Segundo Gunther (2006), um coletor linear Fresnel utiliza o princípio de dividir um elemento óptico em segmentos que têm em conjunto o mesmo efeito óptico, ou muito semelhante, do elemento óptico original. Assim, é possível, por exemplo, dividir um coletor parabólico em segmentos, formando um coletor Fresnel linear, como pode ser visualizado na Fig. (3.1).



Figura 3.1 - Comparação da concentração da radiação entre o coletor parabólico e o coletor Fresnel linear.

Fonte: Gunther (2006).

A Fig. (3.2) ilustra um exemplo de refletor Fresnel linear e seus componentes. Segundo a Anthro Power (2014), os principais componentes do refletor são:

1. Espelho: Um conjunto de espelhos altamente reflexivos são utilizados como refletor. Estes espelhos refletem os raios proveniente do Sol para o receptor.
2. Folha ondulada: É uma estrutura ondulada de metal. O espelho é colado nesta superfície que, além de dar um bom suporte mecânico ao espelho também protege a pintura reflexiva do espelho contra a corrosão.
3. Estrutura de sustentação: O refletor (espelho) segue o Sol com a ajuda da estrutura de sustentação do espelho.

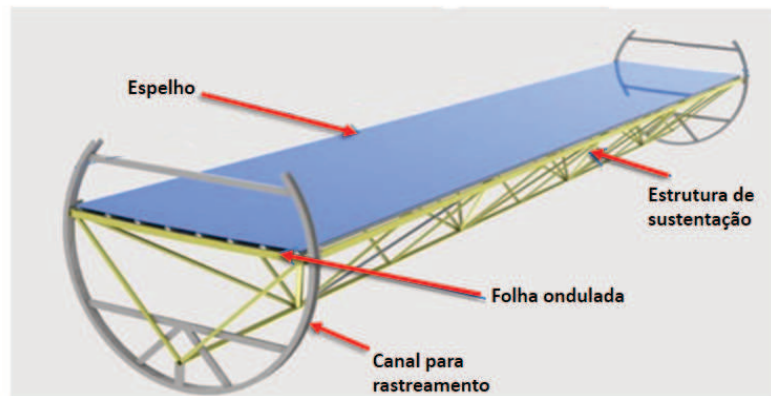


Figura 3.2- Exemplo de refletor Fresnel linear e seus componentes.

Fonte: Anthro Power (2014).

Para Gunther (2006), os parâmetros mais importantes na concepção dos coletores são: a largura dos espelhos individuais, a largura total do coletor, o número de fileiras paralelas de espelhos, a altura entre o plano do espelho e o absorvedor, o espaço entre os espelhos e a curvatura dos espelhos. Para todos estes parâmetros uma medida ideal tem de ser encontrada:

- a) A largura dos espelhos individuais não deve ser muito estreita, porque isso significaria a mesma área de abertura para um número muito elevado de espelhos. Por outro lado, eles não devem ter uma grande largura porque reduziria a eficácia do princípio de funcionamento do tipo de espelho de Fresnel. Nos espelhos mais largos, os efeitos de astigmatismo são mais fortes;
- b) A largura do coletor: coletores muito estreitos têm a desvantagem de ter área de abertura menor, impactando no fluxo de radiação refletido para o tubo absorvedor. Coletores maiores, por outro lado, apresentam o problema de que a contribuição das partes exteriores do coletor, que se encontram mais distantes do tubo absorvedor, é menor e muito mais sensível a erros de seguimento.

Outro fator que interfere no desempenho é o número de espelhos. Walker (2013), salienta que a produção de energia térmica aumenta rapidamente para o primeiro número de espelhos que foram adicionados, mas a taxa cai quando a matriz se torna mais ampla. Esta taxa reduzida no aumento da produção de energia térmica é devido ao fato dos espelhos adicionados estarem mais afastados do receptor e o feixe refletido divergir em maior extensão. Na Fig. (3.3) é possível verificar a variação da produção da energia térmica em função número e da largura dos espelhos.

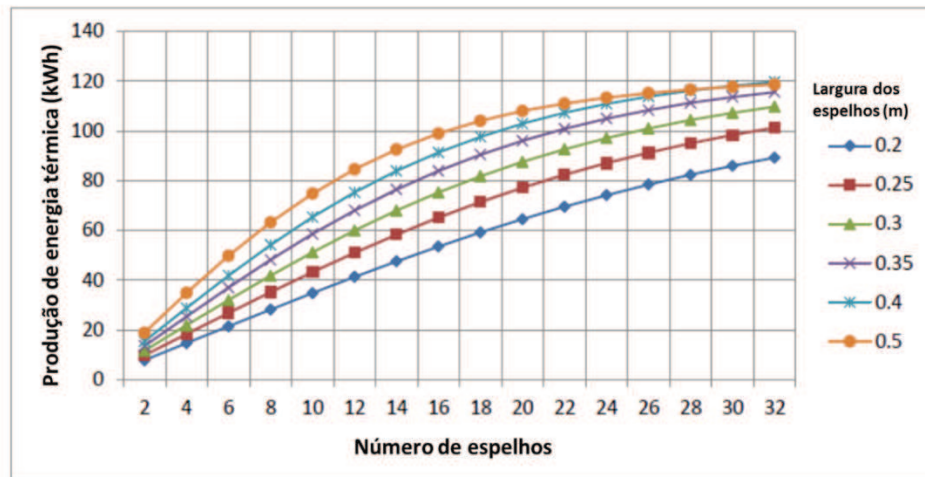


Figura 3.3 - Energia térmica em função do número de espelhos.

Fonte: Walker (2013).

Para um número de espelhos muito grande, adicionar mais espelhos pode não ter um efeito visível sobre a produção de energia térmica. O maior espelho avaliado por Walker foi de 0,5 m de largura e este espelho mostrou a maior taxa de aumento de energia à medida que espelhos são adicionados.

Já o espaçamento entre os espelhos impacta no bloqueio entre os espelhos. Aumentar a folga do espelho reduzirá o bloqueio, mas os espelhos se espalharão mais e isso aumentará tanto a divergência dos feixes refletidos como o espaço que a matriz ocupa no solo. A Fig. (3.4) mostra os resultados do estudo de Walker (2013) para a produção de energia à medida que o espaçamento entre os espelhos (*gap*) aumenta.

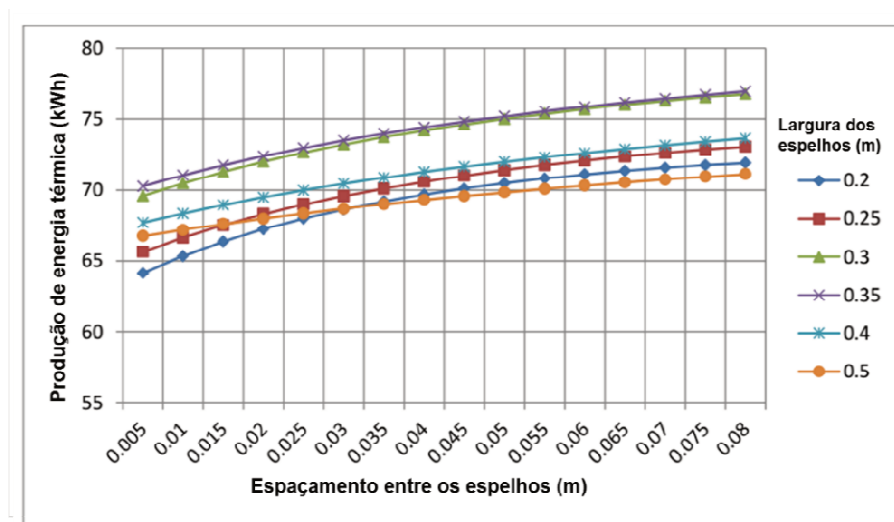


Figura 3.4 - Energia térmica em função do espaçamento entre os espelhos.

Fonte: Walker (2013).

O aumento da produção de energia térmica pelo aumento do *gap* do espelho é perceptível, porém aumenta a área ocupada pelos espelhos (*footprint*). Quando a área ocupada pelos espelhos é um fator importante, então deve ser feito um estudo entre o aumento da energia térmica e o aumento da área.

Finalmente, a curvatura das tiras de espelho é um parâmetro que deve ser considerado. Benyakhlef et al. (2016) realizaram um estudo numérico para investigar o impacto da curvatura do espelho no desempenho óptico de um LFR instalado em Marrocos. As simulações numéricas foram realizadas utilizando o traçado de raios pelo método de Monte Carlo. Os resultados revelam que o impacto da curvatura dos espelhos torna-se significativo nos seguintes casos:

- Quando a flecha do espelho for superior a 3 mm e a altura do receptor for de 6 m: Neste caso, a eficiência óptica do sistema diminui significativamente. Isto ocorre porque a largura da projeção dos raios torna-se maior do que a largura da abertura do receptor. Em outras palavras, o aumento da flecha dos espelhos para uma posição de receptor muito distante do plano do espelho colocaria a linha focal do sistema abaixo do plano do receptor e, portanto, contribuiria para uma divergência dos raios refletidos antes de atingir o plano de abertura do receptor.
- Quando o receptor é colocado perto dos espelhos: A 2 m de altura acima do campo do espelho, o efeito da curvatura do espelho na eficiência óptica é claramente observado, especialmente para pequenos valores de flecha, compreendidos entre 0,2 mm e 3 mm. Para esta gama de flechas, a eficiência óptica aumenta linearmente em 6%. Isto significa que a implementação de espelhos curvos em um LFR pode ser eficiente para receptores próximos ao plano dos espelhos.

Benyakhlef et al. (2016), verificaram que o uso de espelhos curvos com flechas variando entre 1 e 2 mm é suficiente para alcançar uma alta relação de concentração. No entanto, a escolha da curvatura ideal para um determinado sistema LFR deve ser feita, principalmente, de acordo com a eficiência óptica obtida por cada valor da flecha. Quando a flecha do espelho for superior a 3 mm e a altura do receptor for de 6 m a eficiência óptica do sistema diminui significativamente. Isto ocorre porque a largura da projeção dos raios torna-se maior do que a largura da abertura do receptor. Em outras palavras, o aumento da flecha dos espelhos para uma posição de receptor muito distante do plano do espelho colocaria a linha focal do sistema abaixo do plano do receptor, e, portanto, contribuiria para uma divergência dos raios refletidos antes de atingir o plano de abertura do receptor.

Mills e Morrison (2000) compararam a energia entregue por diferentes formatos de espelhos para um refletor Fresnel linear com uma altura do absorvedor de 15 m e 48 espelhos com largura de 0,95 m. Nesse estudo, a energia entregue pelos espelhos com curvatura constante foi 0,6% inferior à energia entregue pelos espelhos com curvaturas variáveis. Já para o caso de espelhos planos, a redução chegou a 13%.

No estudo realizado por Moghimi et al. (2016), uma otimização prática de um LFR com uma configuração de cavidade trapezoidal multitubos foi investigada para obter a maior absorção solar ao longo de um dia. Este estudo centrou-se na realização da otimização de uma curvatura fixa ideal em todo o campo de espelhos como uma alternativa mais prática no projeto da planta em vez de permitir que cada espelho tenha uma curvatura de fabricação única. Curiosamente, uma curvatura com uma distância focal além do centroide da cavidade foi encontrada. Esta configuração resultou em uma redução de apenas 3,4% em comparação com os espelhos curvados individualmente e mais caros.

Quando o receptor é colocado perto dos espelhos, como exemplo, a 2 m de altura acima do campo do espelho, o efeito da curvatura do espelho na eficiência óptica é claramente observado, especialmente para pequenos valores de flecha, compreendidos entre 0,2 mm e 3 mm. Para esta gama de flechas, a eficiência óptica aumenta linearmente em 6%. Isto significa que a implementação de espelhos curvos em um LFR pode ser eficiente para receptores próximos ao plano dos espelhos.

Comparando os resultados obtidos por Mills e Morrison (2000), Moghimi et al. (2016) e Benyakhlef et al. (2016), verifica-se que o impacto da utilização de espelhos curvos é maior para sistemas com receptor perto dos espelhos. Ou seja, o impacto é inversamente proporcional à altura do absorvedor. A maior redução de energia com a utilização de espelhos com curvatura fixa foi obtida por Benyakhlef et al. (2016), com absorvedor de 2 m e a menor foi obtida por Mills e Morrison (2000), que utilizaram um absorvedor localizado a 15 m de altura. As características dos LFR e os resultados obtidos são apresentados na Tab. (3.1).

Tabela 3.1 – Comparação das geometrias dos espelhos.

Autor	Altura do absorvedor	Espelhos	Diferença
Mills e Morrison (2000)	15	48	0,6%
Moghimi et al. (2016)	8	25	3,4%
Benyakhlef et al. (2016)	2	11	6,0%

3.2 RECEPTOR

O receptor é a parte de um sistema de CSP onde a radiação solar concentrada, a partir do coletor, é focada. Segundo Platzer, Dinter e Cuevas (2016), o receptor é composto pela superfície do absorvedor, o concentrador secundário e a placa de vidro. Foram implementadas diferentes configurações para o refletor Fresnel linear. A Fig. (3.5) mostra as configurações mais comuns.

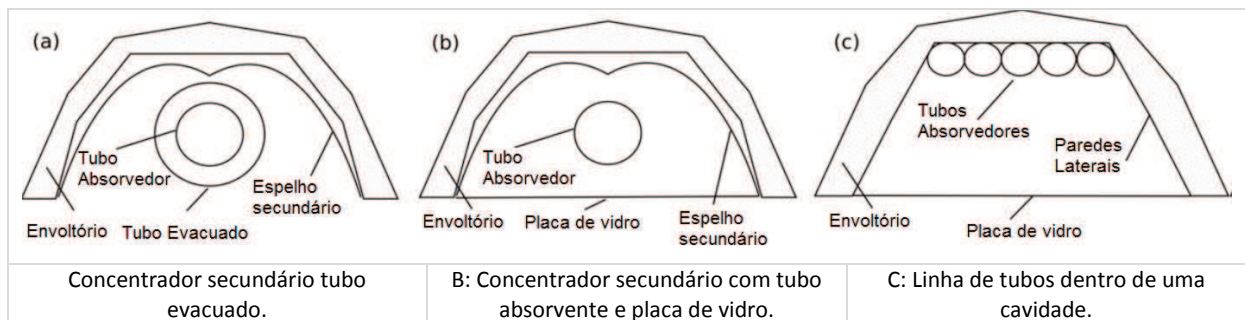


Figura 3.5 - Configurações mais usuais de receptores usadas em coletores Fresnel lineares.

Platzer, Dinter e Cuevas (2016) .

Os receptores são construídos com tubos de aço, geralmente revestidos com uma superfície seletiva, altamente absorvente. A fim de converter a radiação solar eficientemente em calor sensível, as superfícies do tubo absorvedor devem ter uma refletividade muito baixa e, correspondentemente, alta capacidade de absorção. Os tubos podem ser instalados de duas formas: tubo único e multi-tubos.

Os receptores de tubo único, tem o tubo com diâmetro geralmente na faixa de 75 mm a 180 mm. Em geral, este tubo está localizado dentro de uma cavidade provida de um concentrador secundário em forma de dupla parábola e pode ter uma tampa de vidro na parte inferior da cavidade. Houve um grande interesse neste design de tubo único com refletor CPC (concentrador parabólico composto) secundário, que terminou na construção, entre outros, de

um protótipo na Bélgica. Vários estudos foram realizados para otimização termo econômica do projeto: forma específica do concentrador secundário (abertura do CPC e curvatura), altura acima do campo do espelho primário, diâmetros do tubo, materiais, etc. As plantas de Puerto Errado 1 e 2 e o protótipo Fresdemo empregam a tecnologia de tubo único com concentrador secundário (MONTES et al., 2016).

Esta não é a única configuração de tubo único, novos projetos estão considerando a opção do tubo revestido com uma pintura seletiva e protegido do ambiente por uma tampa de vidro, a fim de minimizar as perdas de radiação e convecção e, assim, aumentar a temperatura do fluido. Em estudos realizados por Facão e Oliveira (2011), a eficiência térmica do sistema é 10% superior com a aplicação de uma camada seletiva de níquel quando comparada com uma superfície absorvedora pintada com uma tinta preta comum.

Outra forma de design de receptores é a de multi-tubos. Segundo Montes (2014), o desenho multi-tubos mais convencional consiste numa série de tubos paralelos dispostos horizontalmente numa cavidade, normalmente com uma secção transversal trapezoidal e, portanto, sem concentrador secundário. Uma tampa de vidro pode ser colocada na abertura da cavidade. A principal missão desta capa é proteger o revestimento seletivo, responsável pela redução das perdas térmicas por radiação. O objetivo secundário da cobertura de vidro é minimizar as perdas por convecção .

Estudos realizados por Singh, Sarviya e Bhagoria (2010), compararam o desempenho térmico de quatro absorvedores de cavidade trapezoidal em um refletor Fresnel linear. Secções de tubos retangulares e circulares foram utilizadas como absorvedor. Os tubos do absorvedor foram revestidos com pintura preta comum e superfície seletiva de níquel. O absorvedor revestido de superfície seletiva tinha uma vantagem significativa em termos de desempenho térmico em comparação com o absorvedor pintado com tinta preta comum.

A Fig. (3.6a) apresenta as curvas de eficiência térmica para o concentrador Fresnel com absorvedor de tubo circular com superfície revestida de tinta preta (curva 2) e superfície seletiva (curva 1). A eficiência térmica com o absorvedor revestido com pintura seletiva variou de 44,4% a 71,2% em comparação com absorvedor pintado com tinta preta que variou entre 30,5 a 59,6%. Já a Fig. (3.6b) mostra as curvas de eficiência térmica para o concentrador Fresnel linear com absorvedor de tubo retangular com a superfície revestida de preto (curva 2) e superfície seletiva (curva 1). A eficiência térmica do coletor de Fresnel foi de 38,3 a 63,0% com absorvedor com superfície seletiva e de 28,3 a 54,3% para o absorvedor de tubo retangular pintado de preto. O receptor de tubo circular (multitubo) possui maior área de superfície para absorver energia solar em comparação com o receptor de tubo retangular. A

eficiência térmica com absorvedor circular foi encontrada mais elevada (até 8%) comparada ao absorvedor de tubo retangular.

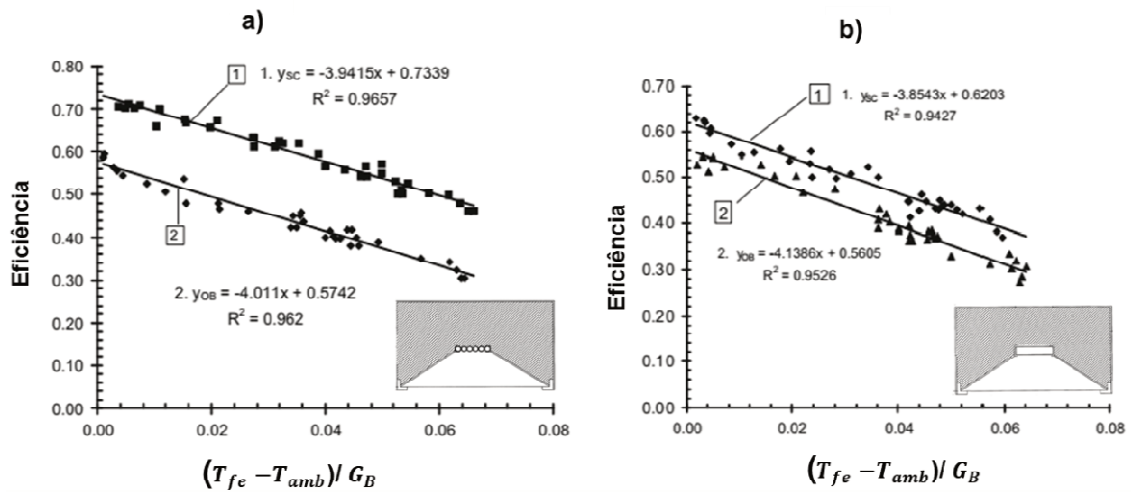
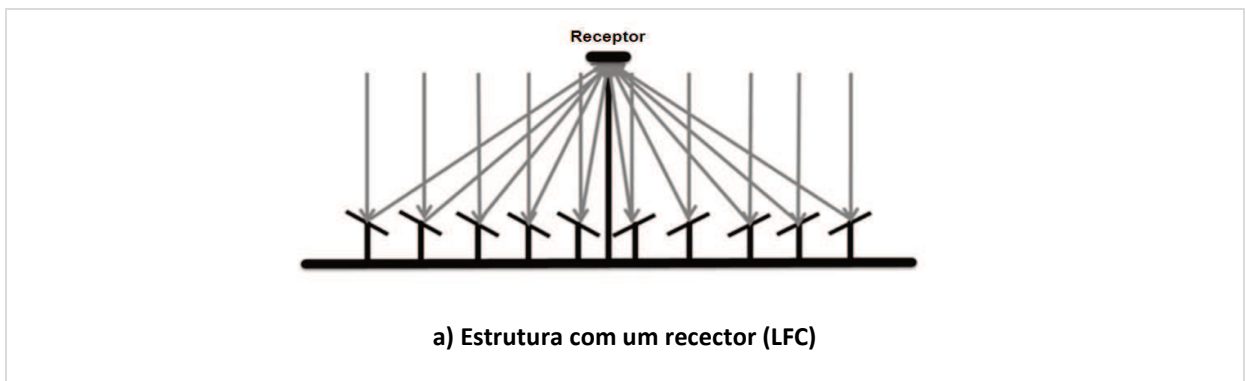


Figura 3.6 - Curvas de eficiência para coletor com absorvedores revestidos com superfície pintada de preto e com superfície seletiva, com razão de concentração, C , de 9,4.

Fonte: Singh (2010).

A estrutura do receptor do concentrador Fresnel pode ser construída com um ou dois receptores, conforme apresentado na Fig (3.7). A principal vantagem da configuração do CLFC (*Compact linear Fresnel collector*) versus LFC central é baseada em que as perdas ópticas de bloqueio diminuem drasticamente, graças ao uso de dois receptores para cada conjunto de espelhos.

Montes (2014) apresenta três configurações: um LFC central com receptor horizontal (Fig. 3.7a), e dois conceitos diferentes de CLFC com receptor horizontal: CLFC completo (Fig. 3.7b), onde todos os espelhos alternam sua inclinação focalizando para um ou outro receptor e o híbrido CLFC (Fig. (3.7c), onde apenas os espelhos mais distantes de ambos os receptores, isto é, os localizados no centro do campo, alternam a sua inclinação apontando para um ou outro receptor.



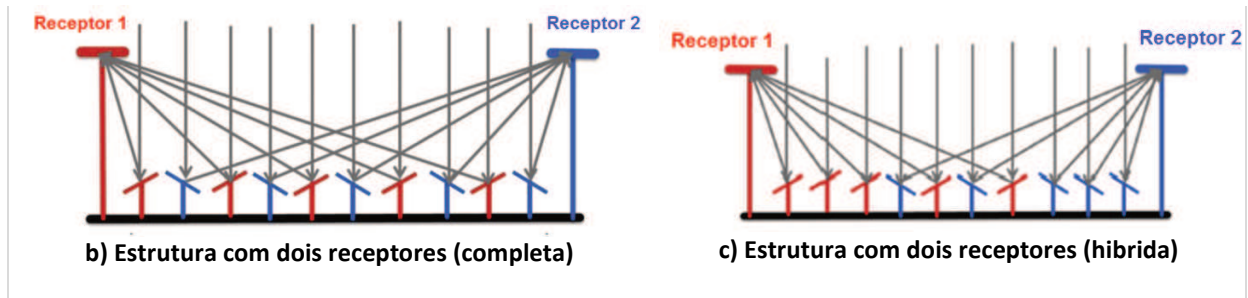


Figura 3.7 - Tipos de configuração do receptor de um LFR.

Fonte: Montes (2014).

Almeida (2013) salienta que para o dimensionamento de um sistema LFR há uma relação de compromisso entre a altura do receptor e a oclusão entre espelhos. Uma maior altura do receptor traduz-se num aumento do erro da concentração focal, mas por outro lado, uma altura baixa do receptor bloqueia o trajeto dos raios solares refletidos pelos espelhos mais afastados do receptor horizontal.

Estudos realizados por Walker (2013) indicam que para o tamanho individual de cada espelho a largura ideal do receptor é aproximadamente a largura do espelho mais 50 mm. Isto só é válido para espelhos planos usados dentro das limitações definidas pelo espaço ocupado (*footprint*) de 4 m. Para largura de receptor abaixo da largura do espelho, há uma redução significativa no desempenho. Uma vez que a largura do receptor aumenta para além do seu valor ótimo, o efeito do sombreamento dos espelhos torna-se mais perceptível e ocorre uma evidente redução gradual na energia térmica produzida.

3.3 FLUIDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Segunda Silva (2010), entre os vários fluidos de transferência de calor disponíveis, destacam-se os óleos sintéticos, os sais fundidos e a água. Os óleos sintéticos apresentam a vantagem de serem um HTF (*Heat Transfer Fluid*) usado desde as primeiras centrais com tecnologias CSP. Contudo, a sua utilização está limitada a temperaturas até 400 °C, o que condiciona o rendimento do ciclo de vapor. Os sais fundidos são um tipo de fluido estável para temperaturas próximas dos 550 °C, o que, comparativamente aos óleos sintéticos, possibilitam o aumento da eficiência global da central. São usados também para armazenamento, entretanto solidificam a temperaturas abaixo dos 240 °C, sendo necessário o consumo de energia durante a noite para mantê-lo aquecido. Também, a corrosão dos receptores é outro problema quando se trabalha com sais fundidos. A vantagem da utilização

da água como HTF reside na produção direta de vapor, mas a sua utilidade como fluido de transferência de calor está ainda em discussão.

Segundo Weinstein et al. (2015), os óleos oferecem a melhor combinação disponível em relação ao ponto de congelamento e o limite de temperatura máxima. Eles podem ser minerais ou óleos sintéticos. Os óleos minerais, em geral, incluem uma mistura de alcanos mais elevados obtidos com o petróleo destilado. Os óleos sintéticos, por outro lado, são artificialmente fabricados a partir de componentes de petróleo quimicamente modificados. Óleos sintéticos têm uma condutividade térmica mais elevada e uma viscosidade mais baixa, que os tornam mais atraentes do que óleos minerais.

Segundo Pereira et al. (2014), entre 59 usinas heliotérmicas em operação, a predominância é o uso da mistura de 73,5% de óxido de difenilo e 26,5% bifenilo (Therminol VP-1) em 45 usinas, perfazendo 76,3% do total. Nas demais, 16,9% usam água diretamente como fluido de trabalho e apenas 3,4% utilizam sal fundido.

3.4 SISTEMA DE RASTREAMENTO DO SOL

O sistema de rastreamento (*Tracking System*) é responsável por mover os espelhos do campo primário. O campo principal segue o Sol para refletir a radiação no receptor. O sistema geralmente é montado em uma estrutura de uma base e deve ser capaz de ser adaptado à latitude, à orientação do coletor e, em alguns casos, a uma inclinação.

Segundo Platzer, Dinter e Cuevas (2016), deve ser preciso e durável em condições adversas. A vida esperada é comparável à do campo primário (entre 20 e 25 anos). Idealmente, a orientação do coletor é norte-sul ao longo do plano longitudinal. Neste caso, o sistema de rastreamento segue o movimento aparente do Sol de leste para oeste. A mudança angular para todos os espelhos é a mesma, significando que um dispositivo pode mover todos os espelhos no plano transversal. A Fig. (3.8) apresenta três configurações de sistemas de rastreamento. A primeira configuração (Fig. 3.8a) apresenta um atuador para cada espelho, a segunda (Fig. 3.8b) apresenta um único atuador que gira todos os espelhos (no plano transversal) por meio de um acoplamento mecânico. A terceira configuração (Fig. 3.8c) apresenta três atuadores para um conjunto de espelhos, permitindo mais flexibilidade na operação do coletor (por exemplo, algumas linhas podem ser desfocadas para melhor controlar a temperatura do fluido de trabalho). A decisão é uma compensação de custo-benefício.

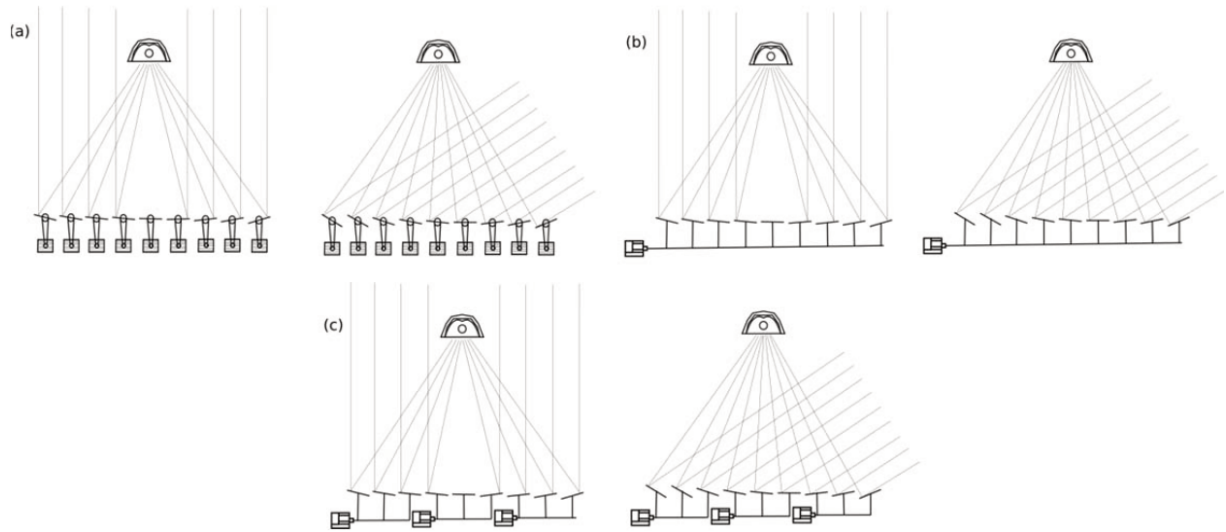


Figura 3.8 - Tipos de sistemas de rastreamento.

Fonte: Platzer, Dinter e Cuevas (2016).

3.5 ESTRUTURA

Segundo Platzer, Dinter e Cuevas (2016) a estrutura fornece não só o apoio a todos os elementos funcionais, como espelhos e receptores, mas dá também mais rigidez ao coletor. Ele suporta o campo primário e o receptor. O quadro pode ser feito de aço galvanizado ou alumínio. O conjunto pode ser feito com parafusos, rebites e soldagem ou por métodos de conexão mais avançados e especiais. A estrutura é conectada ao chão por fundações. Normalmente, as fundações são feitas de concreto. Mas em alguns casos parafusos de terra adequados também podem ser usados. A estrutura tem uma contribuição considerável para o peso do coletor. Idealmente, tem que ser leve para reduzir o custo do material tanto quanto possível, mas deve ser capaz de proporcionar a rigidez suficiente para o coletor. A sombra sobre o campo primário tem que ser mínima.

Existem três modelos que dominaram o mercado. A Fig. (3.9) mostra um esboço destes desenhos. O primeiro apresenta um pilar central e tensores laterais, com três fundações localizadas nos extremos. O segundo modelo apresenta dois pilares em ângulo (forma de A), com duas fundações localizadas nos extremos. O último modelo apresenta dois pilares em forma retangular e duas fundações localizadas simetricamente.

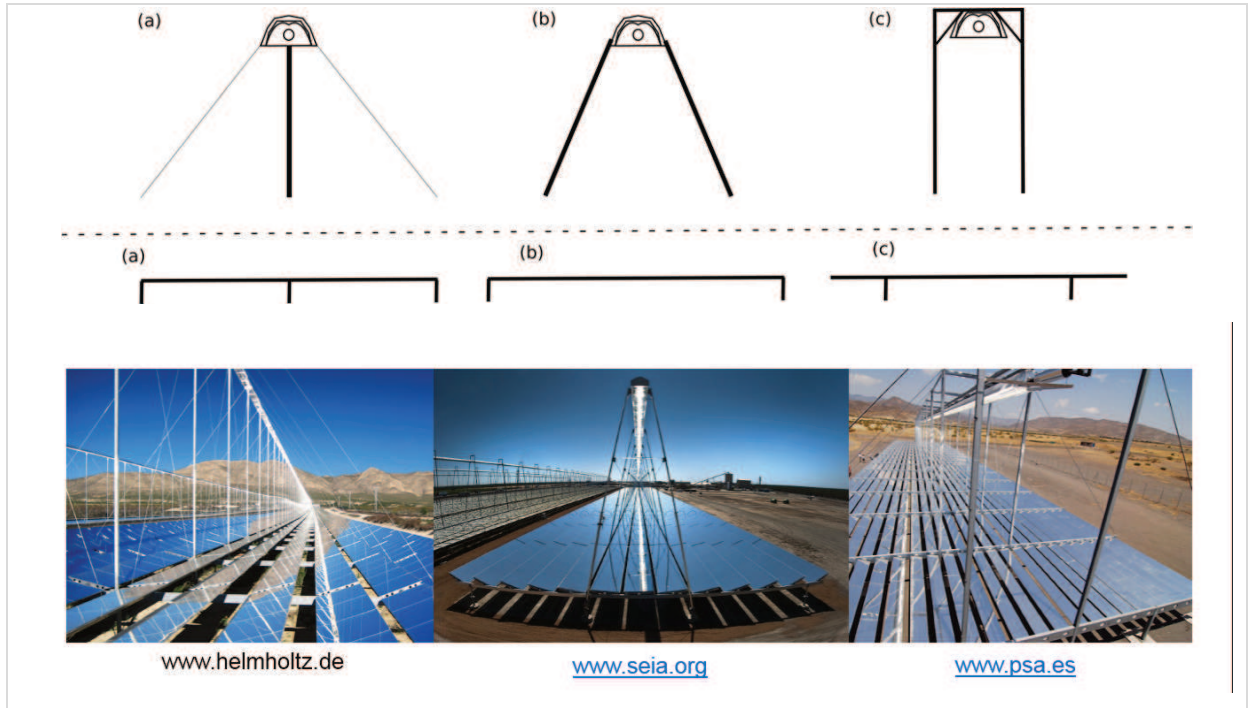


Figura 3.9 - Vista frontal de tipos de estrutura de coletor e suporte do receptor.

Fonte Adaptado de Platzer, Dinter e Cuevas (2016).

4 DESEMPENHO TÉRMICO

Segundo Kalogirou (2016), o desempenho térmico de coletores solares pode ser determinado mediante análise detalhada das características ópticas e térmicas da concepção de materiais e design do concentrador, ou por testes de desempenho experimental sob condições controladas. Tal análise é geralmente desenvolvida durante a elaboração de protótipos, que são testados em condições ambientais definidas.

Uma série de normas descrevem os procedimentos de teste para o desempenho térmico de coletores solares. As mais conhecidas são a EN 12975-2(2006), a ISO 9806 (2013) e a ANSI/ASHRAE 93 (2010). Essas normas podem ser utilizadas para avaliar o desempenho tanto de coletores solares concentradores como de placa plana.

Como resultado dos ensaios, pode-se obter a curva de desempenho do coletor, apresentada na Fig. 4.1, na qual o eixo vertical é a eficiência instantânea do coletor e no eixo horizontal a razão entre a diferença de temperatura e a irradiância solar incidente na abertura do coletor. A intersecção da curva com o eixo vertical é o local onde a temperatura do fluido que entra no coletor é igual a temperatura ambiente e a eficiência do coletor está no seu máximo. A inclinação da curva para os coletores concentradores é muito menor do que aquela dos coletores de placa plana. Isto resulta das perdas térmicas inversamente proporcionais à razão de concentração, C . Esta é a maior vantagem dos coletores concentradores, isto é, a eficiência dos coletores de alta concentração permanece elevada mesmo com altas temperaturas de entrada; por isso esse tipo de coletor é adequado para aplicações de alta temperatura.

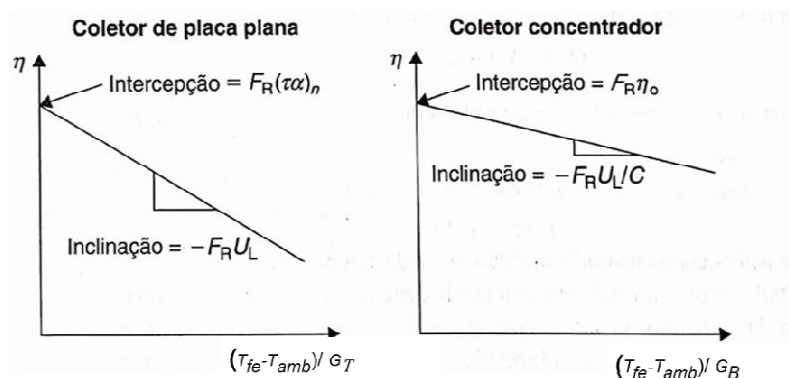


Figura 4.1 - Curva de típicas de desempenho do coletor.

Fonte: Kalogirou (2016).

O comportamento do concentrador pode ser representado pela Eq. (4.1):

$$\eta = F_R \eta_0 - \frac{F_R U_L}{C} \left(\frac{T_{fe} - T_{amb}}{G_B} \right) \quad (4.1)$$

onde η é eficiência do concentrador, η_0 é a eficiência óptica do concentrador, F_R é fator de remoção de calor, U_L é o coeficiente global de transferência de calor do concentrador, C é a razão de concentração, T_{fe} é a temperatura de entrada do fluido de trabalho no absorvedor, T_{amb} é temperatura ambiente e G_B é a irradiância solar direta.

Porém, para considerar o comportamento anual do LFR, deve-se determinar a interferência do Modificador do Ângulo de Incidência, IAM (transversal e longitudinal). A Fig. (4.2) apresenta o comportamento da curva do IAM transversal e longitudinal em função do ângulo de inclinação de um LFR. As oscilações dos valores no início da curva do IAM transversal se deve ao efeito de sombreamento dos espelhos.

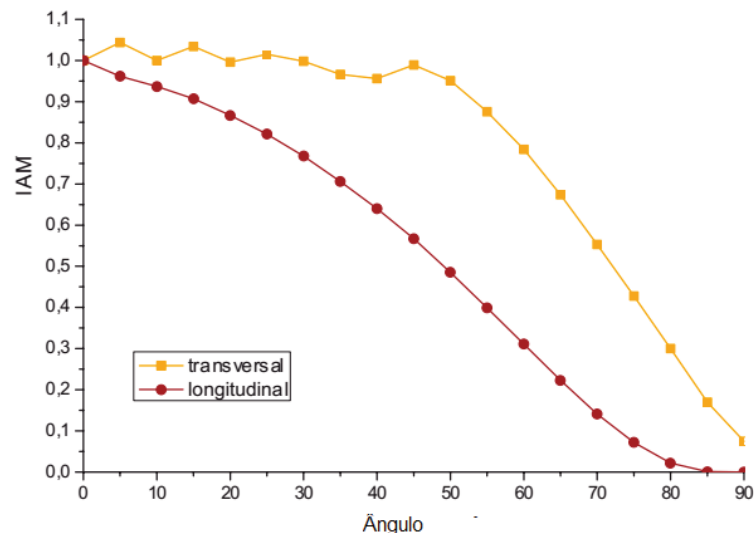


Figura 4.2 - Curvas do modificador do ângulo de incidência transversal e longitudinal de um LFR.

Fonte: Industrial Solar (2017).

Horta e Osorio (2014) lembram que uma abordagem simples para a determinação de um IAM composto, baseando-se apenas no produto dos correspondentes valores de IAM transversais e longitudinais, foi proposta nos anos 80 por McIntire (1982) e adotada nas normas de teste de coletores como um método adequado. Embora fornecendo uma boa abordagem ao tratar com sistemas ópticos simples, sua precisão fica aquém ao tratar com sistemas mais complexos, por exemplo o LFR.

A caracterização óptica e térmica de coletores solares térmicos, conforme a norma E905, estabelece um quadro de procedimentos a serem adotados no teste de concentradores solares (foco em linha). A caracterização óptica do coletor baseia-se na eficiência óptica e

valores IAM discretos (planos longitudinais). Conforme já observado em concentradores LFR, tais parâmetros podem ficar abaixo do esperado quando se descreve com precisão o desempenho óptico de sistemas complexos. Por outro lado, a aplicação de procedimentos de teste (em condições normais de incidência) pode ser de difícil aplicação para concentradores LFR.

São necessárias condições de incidência solar próximas da normal do coletor, ao redor do meio-dia solar. Tal exigência é facilmente satisfeita para os coletores que não apresentam efeitos de incidência transversal (como a PTC). Para coletores onde os efeitos de incidência transversal estão presentes (como os concentradores LFR), condições de incidência normal só podem ser atendidas em um período muito limitado (ou mesmo inexistente) do ano, por exemplo, em latitudes tropicais. Um período aumentado com condições quase normais exigiria, para esses coletores, uma plataforma com rastreamento azimutal e ângulo de inclinação variável, além do uso do sistema de rastreamento de um eixo do coletor.

Por isso, tais resultados podem ser produzidos através de simulação com um modelo óptico validado experimentalmente. Uma tentativa de atenuar tais requisitos foi introduzida na última versão da ISO 9806. Levando em conta a indisponibilidade de uma plataforma de rastreamento de eixo duplo para LFR, é definido um IAM *off-normal* opcional, considerando que tal abordagem permite o cálculo do IAM sem uma referência normal.

4.1 PERDAS ÓPTICAS

As perdas ópticas de concentradores LFR são causadas pela geometria do campo de espelhos e também em função da latitude local. Estas perdas são mais significativas em LFR de pequeno porte, que limitam a energia recebida pelo absorvedor que é refletida pelo campo de espelhos. Essas perdas são mais intensas nos LFR localizados em altas latitudes, podendo ocasionar que o absorvedor fique completamente na sombra em dias de inverno.

4.1.1 Perdas de Final de Linha

Um dos fatores que afetam o desempenho óptico do LFR é a perda de final de linha, produzida pela parte do receptor que não é o iluminado pelo campo de espelhos (Fig. 4.3) e tem influência direta na eficiência óptica do sistema.

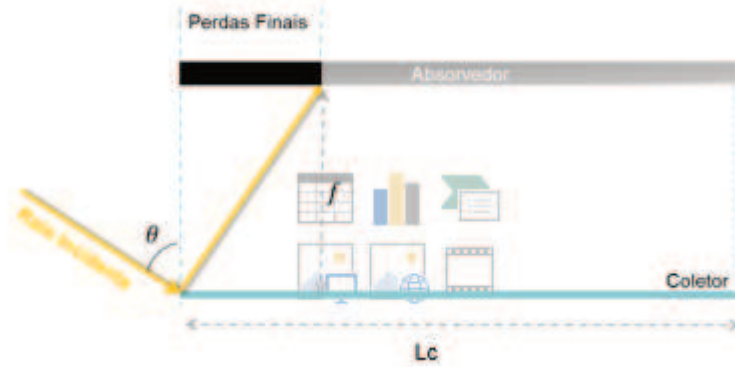


Figura 4.3 – Ilustração das perdas finais de linha no absorvedor.

Segundo Eck (2014), usando o comprimento do coletor L_c , o fator de perda final (η_{end}) é escrito utilizando a Eq. (4.1):

$$\eta_{end} = 1 - f \frac{\tan(\theta_L)}{L_c} \tag{4.1}$$

onde f é a distância focal de um coletor e l_{coi} é a largura de abertura do coletor.

Segundo estudos realizados por Heimsath (2014), a influência da perda de final de linha aumenta para comprimentos mais curtos de coletor, conforme pode ser visualizado na Fig. (4.4a). Para linhas de coletores menores de 100 m, o impacto aumenta rapidamente. A variação das perdas de final de linha em função do comprimento para três ângulos de zênite (30° , 45° e 60°) pode ser visualizada na Fig. (4.4b). O impacto é mais acentuado para ângulos de zênite maiores, como por exemplo para 60° .

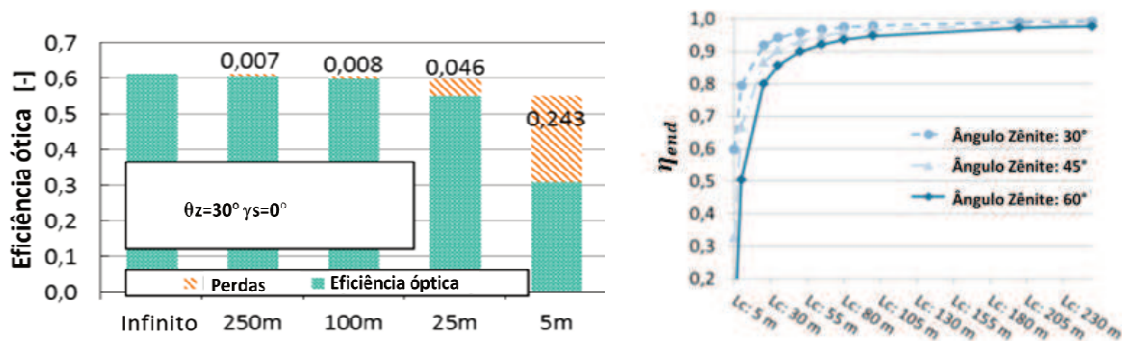


Figura 4.4 - Efeitos das perdas de final de linha no rendimento de um LFR: a) para diferentes comprimentos do coletor; b) para diferentes comprimentos e ângulo de zênite.

Fonte: Heimsath (2014).

Na mesma linha de pesquisa, Elmaanaou e Saifaoui (2014) estudaram a perda de final de linha em um sistema refletor de Fresnel linear. A análise matemática foi feita de acordo

com a altura e comprimento do receptor, número do dia do ano e latitude. Os resultados mostraram que as melhores eficiências diárias não foram registradas no verão. Em vez disso, elas foram registradas em 21 de março e 21 de outubro, nos equinócios de primavera e outono. A Fig (4.5) mostra a variação do fator de perdas de final de linha ao longo do ano, para quatro comprimentos do receptor (5, 10, 15 e 20 m). O LFR está localizado em Casablanca, Marrocos, latitude de 33°.

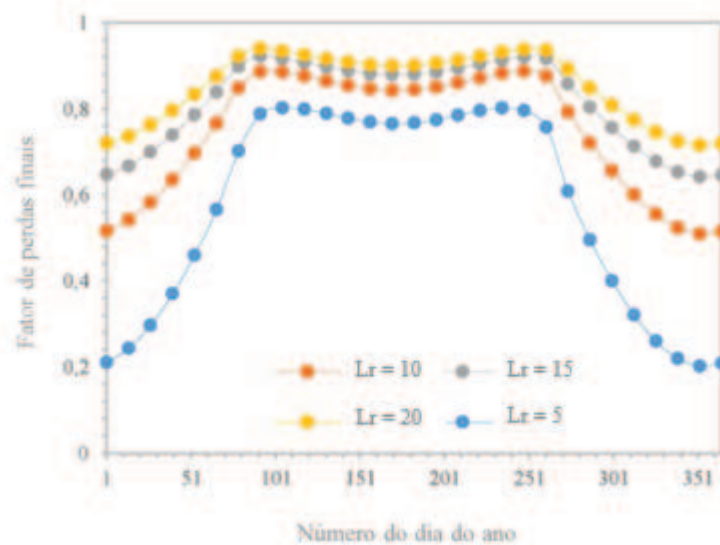


Figura 4.5 - Variação da perda de final de linha ao longo do ano.

Fonte: Elmaanaou e Saifaoui (2014).

Os resultados indicaram que um receptor longo apresenta melhor eficiência, mas especialmente uma eficiência mais estável durante todo o ano. De fato, a diferença entre o máximo e o mínimo durante um ano foi menor para o receptor longo, foi igual a 0,22 para um comprimento de 20 metros e igual a 0,6 para um comprimento de 5 metros.

A Fig. (4.6) apresenta a variação da perda de final de linha de acordo com a latitude para diferentes comprimentos do receptor. A melhor eficiência foi registrada para a latitude igual a 0° e um receptor de 40 m de comprimento. Nessa condição, a eficiência foi de 0,49 e diminuiu para latitudes maiores. No entanto, esta diminuição foi maior para os pequenos receptores do que para os longos.

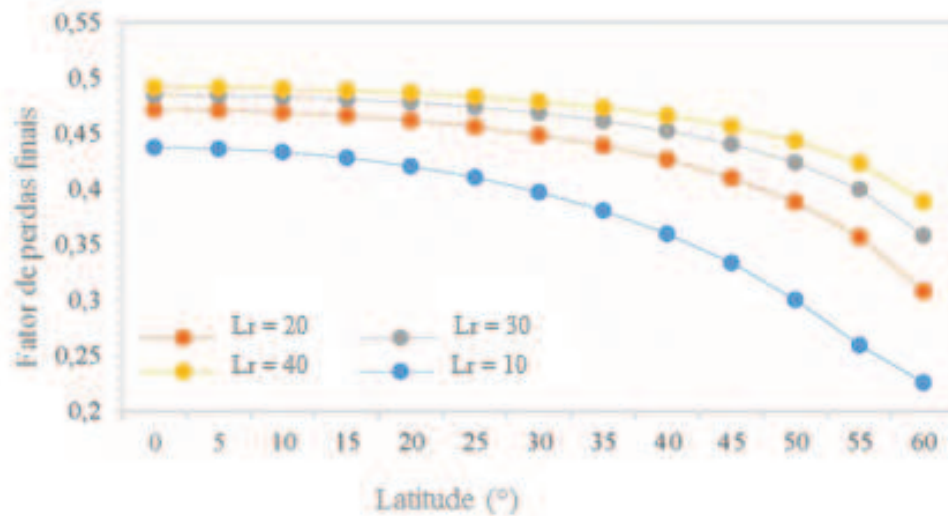


Figura 4.6 - Variação da perda de final de linha com a latitude para diferentes comprimentos de receptor.

Fonte: Elmanaou e Saifaoui (2014).

4.1.2 Bloqueio e Sombreamento

O LFR possui longas fileiras de espelhos (refletores) colocadas paralelas entre si. Uma parte da área de abertura de uma fileira pode causar sombreamento e bloqueio, conforme pode ser observado na Fig. (4.7). O sombreamento ocorre quando um espelho bloqueia parte dos raios solares que incidiriam no espelho adjacente. O bloqueio ocorre quando um espelho impede que os raios refletidos do espelho adjacente sejam direcionados para o receptor. Assim, a área completa de abertura do espelho não é utilizada.

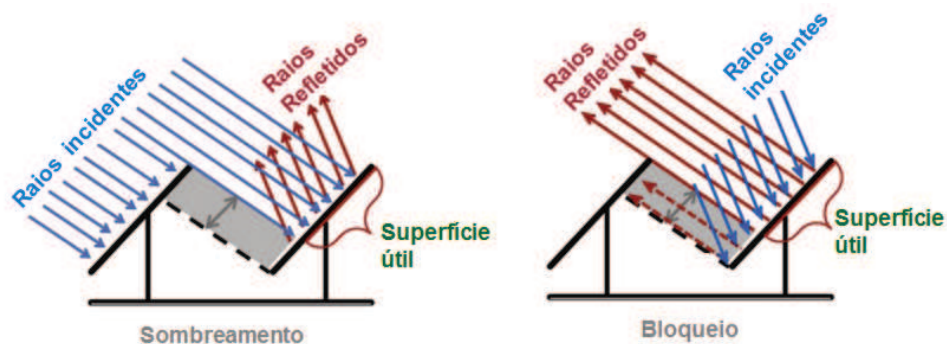


Figura 4.7 - Efeitos de sombreamento e bloqueio entre os refletores.

Fonte: Adaptado de Montes (2014)

Segundo Kalogirou (2016), a maior vantagem do refletor Fresnel linear é que usa refletores planos ou elasticamente curvados, os quais são mais baratos do que refletores

parabólicos e ainda são montados próximos ao solo, minimizando requisitos estruturais. Porém, apresenta uma dificuldade que é a redução do sombreamento e o bloqueio entre os refletores adjacentes, o que leva a um espaçamento maior entre os refletores.

Uma distância maior entre espelhos garante a ausência de sombreamento entre eles, mas ao mesmo tempo, induz a uma maior dispersão da radiação refletida pelos espelhos, à altura do receptor, em função da maior distância dos espelhos em relação ao absorvedor. Aplicar um menor espaçamento entre espelhos garante uma precisão maior dos raios refletidos no ponto focal, no entanto, leva o sistema a um sombreamento indesejável nos espelhos adjacentes uns aos outros. Assim, para garantir uma boa concentração da radiação solar refletida, é necessário encontrar um meio-termo entre sombreamento e precisão focal (ALMEIDA, 2013).

Segundo Sharma et al. (2015), as perdas de sombreamento anuais reduzem com o aumento da relação entre a distância entre espelhos e a largura do espelho. As perdas anuais de sombreamento podem representar 19,5% da radiação incidente. Os locais com latitudes mais altas experimentam perdas de sombreamento mais elevadas. Já as perdas anuais de bloqueio não são afetadas pela orientação e latitude do coletor, mas dependem apenas da relação da distância dos espelhos ao receptor, H , e da largura dos espelhos, W_e , multiplicado pelo número de espelhos (n_e), ou seja $H/(n_e W_e)$, e diminuem com o aumento de $H/(n_e W_e)$. As perdas anuais de bloqueio podem representar 4% da radiação total recebida. A Fig. (4.8) detalha os parâmetros geométricos característicos do coletor.

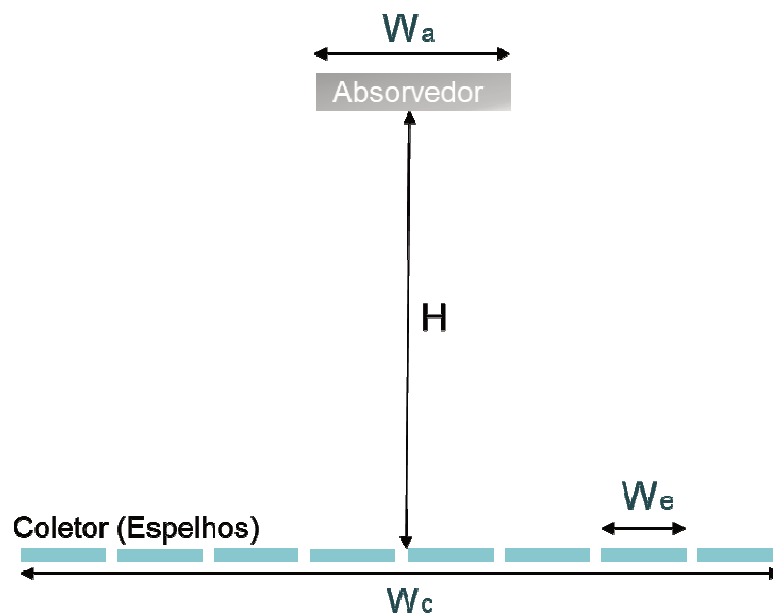


Figura 4.8- Parâmetros geométricos característicos do coletor.

4.2 ENSAIOS

Segundo Osório e Carvalho (2012), os testes de desempenho e de qualidade de coletores solares tem uma história bastante longa. As normas europeias atuais foram desenvolvidas com base nas normas ISO e ASHRAE criadas antes de 1990. Nos métodos de ensaio mais comuns recomendados pelas normas ISO 9806, EN 12975-2 e ASHRAE 93, o desempenho térmico do coletor é determinado em condições estacionárias. A EN 12975-2 também permite o ensaio de acordo com o método quase dinâmico, realizado em condições naturais (exteriores) com radiação variável e temperatura ambiente.

Nos últimos anos, este método tem sido aplicado a vários tipos de coletores solares, nomeadamente placas planas, concentradores parabólicos compostos e coletores tubulares evacuados. Os coletores de concentração também são mencionados na ASHRAE 93, ISO9806-1 e EN 12975-2, mas não foram desenvolvidos métodos de ensaio específicos nestas normas.

4.2.1 Modelo Estacionário

Se considera que um concentrador está operando em condições de estado estacionário sobre um período de medida dado se nenhum dos parâmetros experimentais se desvia de seus valores médios, sobre o período de medida, dos limites estabelecidos pelas normas. Por exemplo: a flutuação da irradiância solar direta e difusa é limitada em $\pm 4\%$, a variação da temperatura de entrada do fluido de trabalho do absorvedor deve ser inferior a $1\text{ }^{\circ}\text{C}$; a flutuação do produto $\dot{m}C_p$ é limitada em $\pm 1\%$; a variação máxima da temperatura ambiente deve ser de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a velocidade do vento deve ser inferior a $4,5\text{ m/s}$ (ASTM, 2013).

No entanto, essas medições ao ar livre custam muito caro, pois exigem grandes capacidades de aquecimento e resfriamento para atender aos requisitos operacionais de estado estacionário.

4.2.2 Modelo Quase Dinâmico

O modelo quase dinâmico deriva do modelo de estado estacionário, adicionando alguns termos de correção que permitem uma descrição mais detalhada do coletor. A irradiância solar é agora considerada em suas duas componentes, direta e difusa, com modificadores de ângulo de incidência correspondentes. A dependência da velocidade do

vento é modelada por dois termos corretivos, o efeito do vento sobre o desempenho óptico e sua influência sobre as perdas de calor. Finalmente, a última correção descreve a dependência de perdas devido à radiação de comprimento de onda longa incidente sobre o coletor.

O sistema de aquisição de dados deve permitir que estas grandezas sejam adquiridas a uma taxa de 1 a 6 segundos. As médias de cada variável devem ser calculadas para intervalos de 5 a 10 minutos e associados ao instante temporal central do intervalo, de forma a ser calculado o ângulo de incidência da radiação solar correspondente a esse ponto experimental.

5 ESTADO DA ARTE

Jaramillo et al. (2015) apresentaram uma pesquisa aplicada para o desenvolvimento de um Concentrador Solar Linear Fresnel Modular (MLFRC) para aquecimento de água e geração de vapor a baixa temperatura, na faixa de temperaturas de 70 a 110 °C. Através da simulação, a eficiência óptica foi estimada em cerca de 54%. A avaliação do desempenho térmico do MLFRC foi realizado com base na ANSI/ASHRAE 93. A eficiência máxima obtida se aproximou de 45%. A curva de eficiência foi estabelecida como uma linha reta, com base no melhor ajuste para a eficiência térmica instantânea, como pode ser verificado na Fig. (5.1).

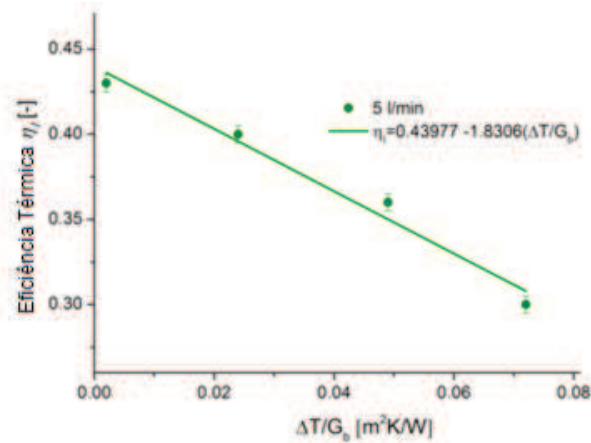


Figura 5.1 - Curva de desempenho do concentrador estudado por Jaramillo et al. (2015).

Song et al. (2015) realizaram um estudo experimental de um refletor Fresnel linear com absorvedor do tipo cavidade triangular (Fig. 5.2). A medição de curva de eficiência do coletor se baseou nos padrões da ASHRAE 93, na forma de medição instantânea.

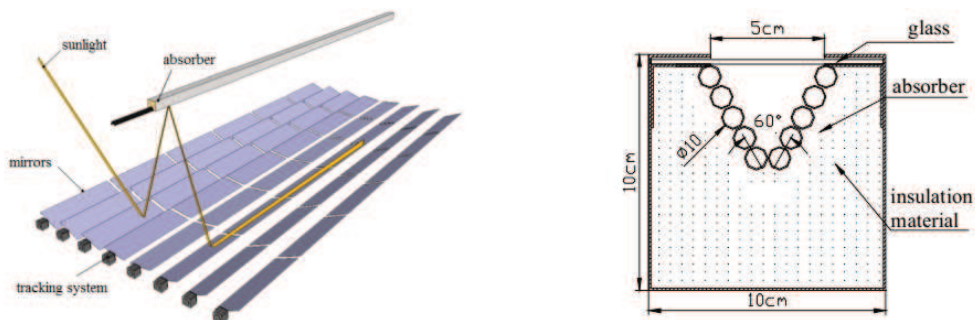


Figura 5.2 - Modelo 3D do coletor LFR e detalhe do absorvedor com cavidade triangular.

Fonte: Song et al. (2015).

O valor médio da eficiência óptica do sistema foi de 55,7% , 11,4% menor do que a eficiência óptica teórica de 67,1 %. Quando a intensidade da irradiância direta foi igual a 675,9 W/m², a eficiência do sistema atingiu 45,2 % com a temperatura de trabalho de 90 °C. A 150 °C, a eficiência caiu para 36,6 %. Ambos resultados ficaram ligeiramente menores do que o esperado pelos pesquisadores. A Fig. (5.3) mostra a curva de eficiência termica do LFR.

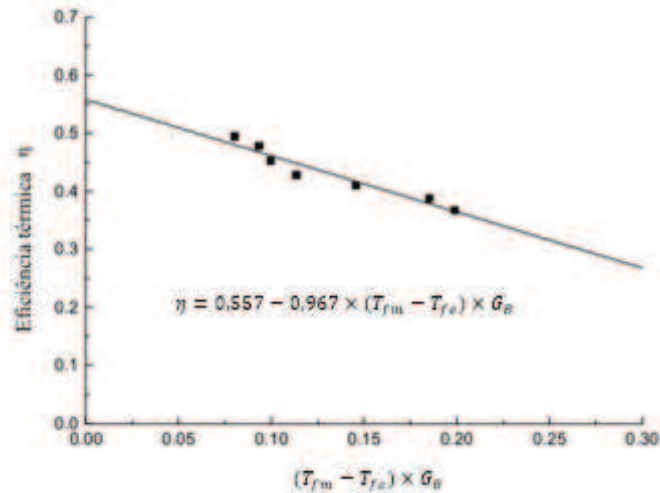


Figura 5.3 - Curva de eficiência térmica do LFR obtida por Song et al. (2015).

Beltagy et al. (2017) realizaram um estudo teórico e experimental de um protótipo de refletor Fresnel linear, mostrado na Fig. (5.4). O protótipo é composto de 14 linhas de espelhos com alinhamento no eixo Norte-Sul e um receptor fixo do tipo CPC (concentrador parabólico composto). As características geométricas da instalação são:

- 14 fileiras de espelhos, com 8 espelhos cada;
- O receptor está a 8,03 m de altura sobre espelhos;
- A abertura do receptor é igual a 300 mm;
- O diâmetro do tubo do receptor é igual a 70 mm.



Figura 5.4 - Protótipo de coletor Fresnel estudado por Beltagy et al.(2017).

A eficiência do protótipo do LFR estudado por Beltagy et al. (2017) apresentou variação significativa durante o dia, de 10 a 43% e a potência máxima atingida foi de 250 kW. A Tab. (5.1) mostra o resumo comparativo dos concentradores mencionados anteriormente. O rendimento óptico variou entre 0,43 e 0,557. Os melhores resultados foram obtidos por Song et al. (2015).

Tabela 5.1 - Comparação da eficiência térmica de protótipos de LFR.

Referência	Curva de eficiência térmica
Jaramillo et al. (2015)	$\eta = 0,43977 - 1,8306(\Delta T/Gb)$
Song et al.(2015)	$\eta = 0,557 - 0,967(\Delta T/Gb)$
Beltagy et al. (2017)	$\eta_{max} = 0,43$

6 METODOLOGIA

Para determinar o desempenho térmico do concentrador foram executadas algumas etapas apresentadas no fluxograma da Fig. (6.1). A partir da pesquisa bibliográfica realizou-se a identificação de metodologias e normativas existentes para determinar o desempenho de concentradores solares. Com base nas normas existentes definiu-se os equipamentos necessários para a realização dos testes. Com a bancada montada, realizam-se testes iniciais para verificar se a bancada atende as condições de estado quase estacionário. Depois das adequações necessárias, realizam-se os ensaios finais para depois calcular o desempenho térmico do concentrador Fresnel linear.

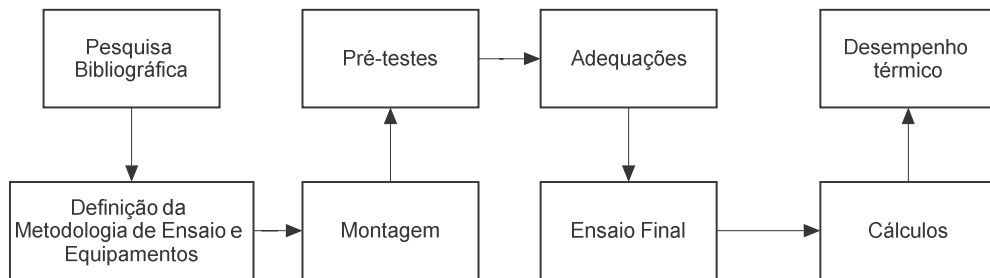


Figura 6.1 - Fluxograma da metodologia a ser utilizada.

6.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Para definição dos equipamentos e de suas características foi realizado um estudo de normas de ensaios e de bibliografia disponível. Os equipamentos utilizados foram: pirheliômetro e piranômetro, RTDs e medidor vazão. As características de cada equipamento, conforme especificado nas normas de ensaio, são apresentadas na Tab. (6.1).

Tabela 6.1 – Características dos equipamentos de medição conforme as normas de ensaio.

Item	Equipamento	Características
Radiação solar direta	Pirheliômetro	<ul style="list-style-type: none"> • O ângulo de abertura do campo de visão do instrumento deve ser entre 5 ° e 6 °. • Exatidão $\pm 1,0\%$ • Escala WRR
Radiação solar global	Piranômetro	<ul style="list-style-type: none"> • Exatidão $\pm 2,0\%$ • Escala WRR
Produto $m\dot{C}_p$	<ul style="list-style-type: none"> • A vazão mássica e o calor específico são determinados separadamente, ou • o produto é determinado usando uma fonte de calor; • ou outra técnica de referência. 	Exatidão $\pm 2,0\%$ para cada ponto de aquisição de dados. OBS: A temperatura do fluido a ser utilizada em cada “determinação” deve ser a média da temperatura do fluido na entrada e na saída do coletor.
Sistema de rastreamento	Não especificado	Limitar o erro em 0,1°
Ângulo	Não especificado	Todas as medições angulares, exceto a medição da direção do vento deve ter uma precisão de $\pm 0,1^\circ$.
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Termopar tipo T; • Termoresistência de precisão; • Termômetros de precisão; • Termistores de precisão; • Termopar combinado tipo T 	Exatidão $\pm 0,5^\circ\text{C}$ Precisão $\pm 0,2^\circ\text{C}$
Diferença de temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Outros dispositivos iguais ou melhores do que aqueles listados acima; 	Exatidão $\pm 0,1^\circ\text{C}$ Precisão $\pm 0,1^\circ\text{C}$
Vazão	Não especificado	Exatidão $\pm 1\%$

6.2 MONTAGEM E INSTALAÇÃO

Para a realização dos ensaios foi construída uma bancada experimental constituída do concentrador, equipamentos de medição e controle de temperatura e vazão. Além dos equipamentos de medição, a bancada apresenta um sistema para controle de temperatura, constituído por um *chiller* de absorção, dois trocadores de calores de placas, um trocador de calor com água de circulação e uma resistência controlada por controlador PID. O esquema da bancada de testes é ilustrado na Fig. (6.4).

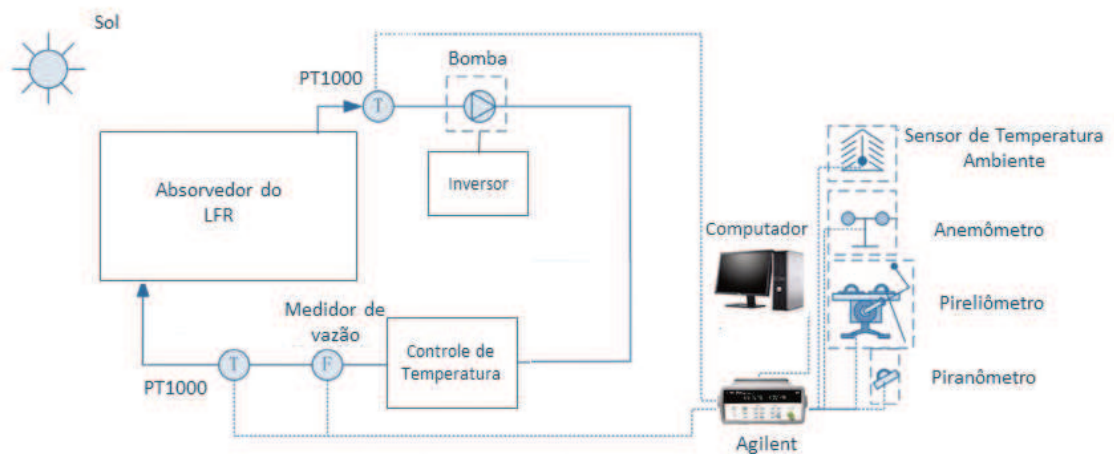


Figura 6.2 - Esquema da bancada de testes.

O concentrador está instalado no Laboratório de Fontes Renováveis de Energia, situado na parte superior do prédio C01 da Universidade do Vale dos Sinos, localizada na cidade de São Leopoldo, sob as coordenadas $29^{\circ}47'35,2''S$ e $51^{\circ}09'09,0''W$. Seu eixo fica orientado no sentido norte-sul com rastreamento leste-oeste. A Fig. (6.2) ilustra a localização geográfica da edificação onde foram realizados os ensaios.



Figura 6.3 - Localização do concentrador no campus da Unisinos.

Fonte: Google Earth (2016).

6.2.1 Espelhos

O coletor utilizado contém 42 espelhos de 300 mm de largura e 2000 mm de comprimento, distribuídos em 14 fileiras de espelhos. Desta forma, a área de espelhos é de

25,2 m² (4,2 m de comprimento e 6 m de largura). Os espelhos foram curvados com uma flecha de 1,87 mm, visando melhorar o desempenho óptico e reduzir o tamanho do receptor. A Fig. (6.4) ilustra o design dos espelhos e suas dimensões. Foi utilizado um espaçamento de 10 mm entre os espelhos adjacentes, resultando em uma área ocupada de 25,98 m².

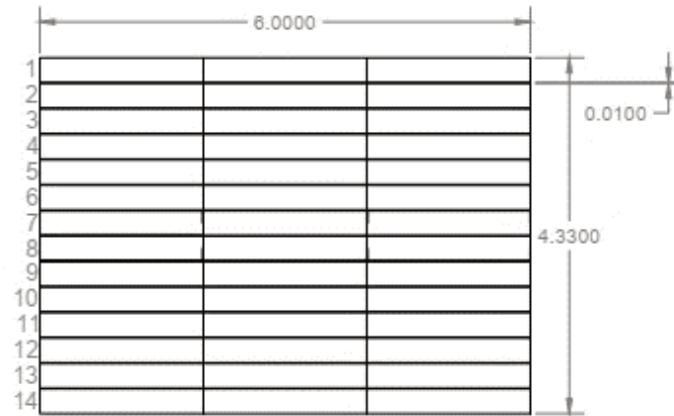


Figura 6.4 - Dimensões do campo de espelhos do concentrador.

Os espelhos originalmente planos foram curvados a frio, dentro do regime elástico de deformação, antes de serem instalados na bancada. Esta curvatura tem como objetivo concentrar a radiação no absorvedor, elevando o fator de concentração e possibilitando atingir maiores temperaturas. Para o concentrador foram adotadas curvaturas cilíndricas, com distancias focais iguais para as 14 fileiras de espelhos. As peças responsáveis pela curvatura dos espelhos foram fabricadas em alumínio e com corte a jato d'água, visando garantir a precisão na curvatura.

Os espelhos foram curvados com uma flecha de 1,87 mm através de um cilindro que pressionava o espelho contra a base de alumínio com a flecha desejada. Em cada espelho de 2 m foram colocadas 11 bases. Para o espelho aderir na base de alumínio foi utilizado um adesivo elástico baseado em polímero modificado com silano. Devido ao tempo de cura do adesivo, os espelhos ficaram 24 horas pressionados. A Fig. (6.5) apresenta o dispositivo utilizado para flexionar os espelhos, bem como o detalhe do espelho sendo flexionado.

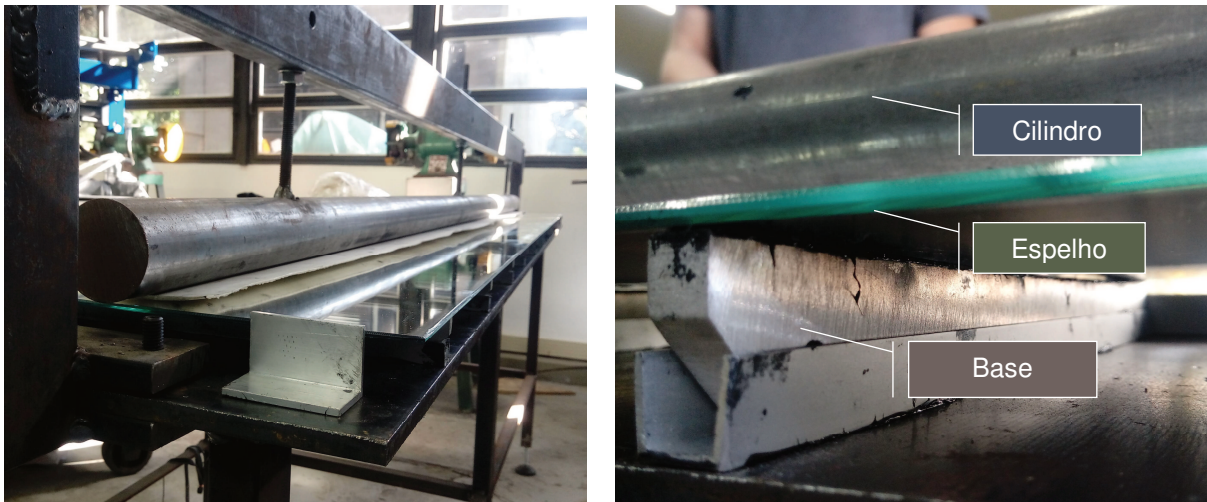


Figura 6.5 – Bancada utilizada para flexionar os espelhos do LFR.

Os espelhos foram instalados através de uma estrutura de sustentação que está conectada ao sistema de rastreamento do Sol, conforme apresentado na Fig. (6.6).



Figura 6.6 - Fileiras de espelhos instalados através da estrutura de sustentação.

6.2.2 Receptor

O receptor, do tipo cavidade, possui de 254,05 mm de abertura e está situado a 3 m de altura em relação ao plano contendo os eixos dos espelhos. Foi construído com duas chapas dobradas de aço com espessura de 0,78 mm. Dentro do concentrador foram instalados 4 tubos

de aço inoxidável pintados com uma tinta preta para alta temperatura, mas sem características seletivas. Cada tubo possui diâmetro externo de 33,40 mm. A medida total da soma dos diâmetros dos quatro tubos contidos no sistema absorvedor é de 133,60 mm, conforme mostra a Fig. (6.7).

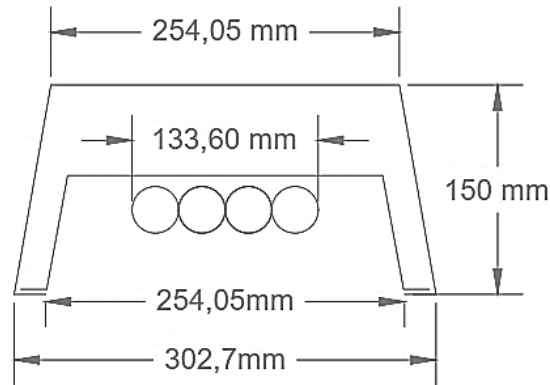


Figura 6.7 - Dimensões do receptor do tipo cavidade e dos tubos de aço.

A decisão de se utilizar um absorvedor com multi-tubos decorreu de aspectos econômicos e construtivos. A curvatura dos espelhos teria que ser muito precisa e acentuada para concentrar a radiação em apenas um tubo, ou a cavidade teria que contar com refletores secundários. O receptor foi instalado através de duas estruturas laterais de apoio e utilizou-se cabos de aço para sustentar a parte central. A Fig. (6.8) apresenta o detalhe da fixação do concentrador com cabos de aço e os tubos de aço inox no interior do absorvedor.



(a)



(b)

Figura 6.8 - Receptor (a) e tubos do absorvedor (b).

6.2.3 Sistema de Rastreamento Solar

O sistema de rastreamento utilizado neste trabalho foi desenvolvido por Oliveira (2018). O sistema dispensa o uso de sensores para determinação da posição do Sol. Esta determinação se dá apenas com base em aspectos astronômicos, utilizando um algoritmo para cálculo de efemérides, onde é possível prever a posição solar através de dados de tempo, constantemente atualizados por um relógio aplicado ao equacionamento programado em um módulo Arduino. O diagrama de blocos, mostrado na Fig. (6.9), ilustra a sequência de componentes responsáveis pelo acionamento dos espelhos.

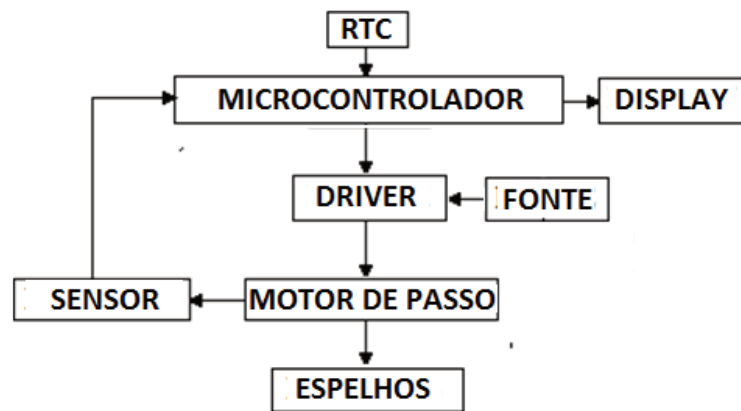


Figura 6.9 - Diagrama de blocos dos componentes do sistema de rastreamento solar.

Fonte: Oliveira (2018).

O sistema de rastreamento possui uma chave que permite passar o controle para o modo manual, permitindo realizar o ensaio de tempo de resposta do concentrador, que necessita desfocar o coletor de modo que a radiação refletida não incida no receptor.

6.2.3.1 Motor de passo

Para a movimentação das 14 fileiras de espelhos foi utilizado apenas um motor de passo. Seu acoplamento é efetuado através de um sistema redutor. Seu método de trabalho consiste em girar o seu eixo de acordo com o número de pulsos elétricos recebidos. O motor utilizado neste trabalho é o modelo NEMA 23 (HT23-402.8). Ele movimentará $0,0012^\circ$ por pulso. O motor de passo utilizado é mostrado na Fig. (6.10) e foi adquirido em conjunto com um sistema de redução de 5:1.

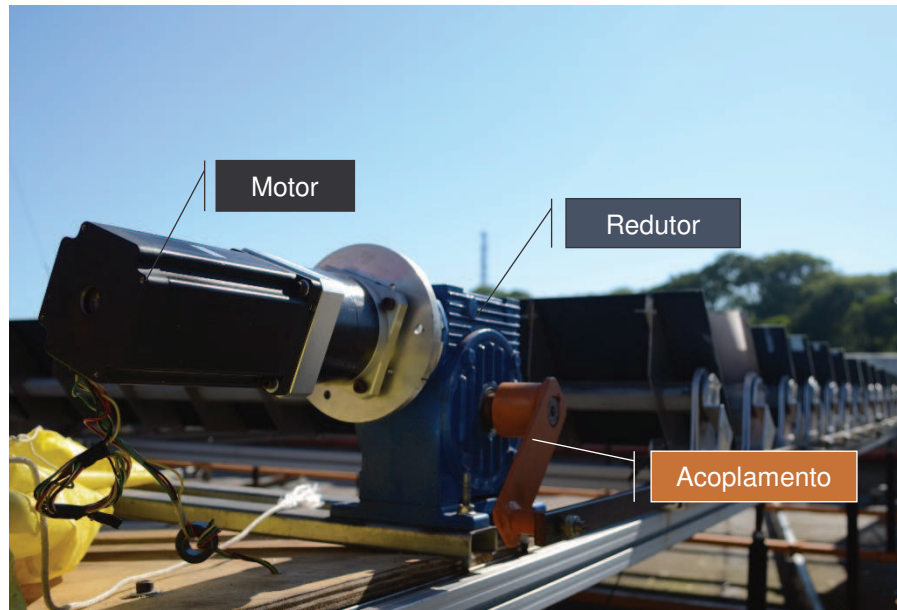


Figura 6.10 - Sistema de movimentação dos espelhos.

6.2.3.2 Medição de ângulo

Com o intuito de efetuar a leitura final do ângulo θ_n e também corrigir eventuais desvios dos elementos citados entre a saída do microcontrolador e o posicionamento final dos espelhos, foi utilizado um sensor de inclinação, modelo Kinax N702 do fabricante Camile Bauer, mostrado na Fig. (6.11), que apresenta uma incerteza de $\pm 0,2^\circ$. Os terminais responsáveis pelo sinal de saída do sensor de inclinação (sinal analógico, de 4 a 20 mA) foram conectados ao módulo Arduino para que possa efetuar a sua leitura. A configuração do conversor possibilitou definir a faixa de atuação do sinal de saída analógico do sensor de 0 a 10 V, com resolução de 5,5 mV ($0,02^\circ$).



Figura 6.11 - Sensor de inclinação.

6.2.4 Sistema de Controle de Temperatura

Visando manter a variação de temperatura de entrada para o coletor, T_{fe} , menor que $\pm 1^\circ\text{C}$, foi construído um sistema de controle de temperatura constituído por um *chiller* de absorção, dois trocadores de calor de placas (modelo P4 da BRAHEX), um trocador de calor com água de circulação, uma resistência elétrica de 12 kW controlada por controlador PID e um tanque. A Fig. (6.12) apresenta o sistema de controle de temperatura do fluido.

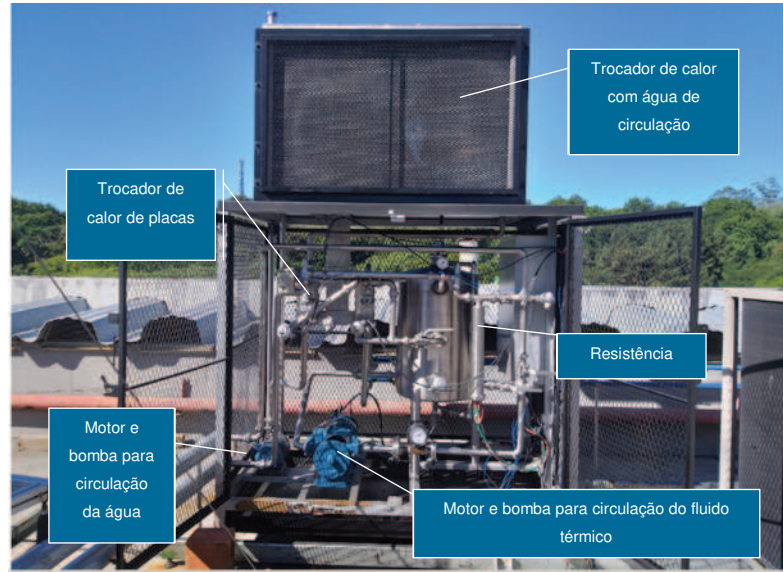


Figura 6.12 - Sistema de controle de temperatura do fluido.

O primeiro trocador de calor de placas (Fig. 6.13) é responsável por retirar o calor do fluido térmico e passar para a água de circulação que, por sua vez, é resfriada em um trocador de calor a ar, com dois ventiladores axiais de 500 W cada, modelo DG500EX (Fig. 6.14). O segundo trocador de calor de placas faz parte do segundo estágio de resfriamento. É responsável por complementar o resfriamento do fluido realizado pelo primeiro trocador de calor de placas, porém utilizando água resfriada pelo *chiller* de absorção. Este segundo estágio, não foi utilizado neste trabalho.



Figura 6.13 – Trocador de calor de placas do sistema de refrigeração do fluido térmico.

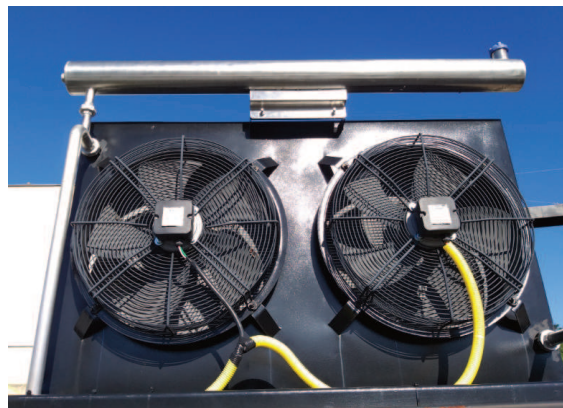


Figura 6.14 – Trocador de calor a ar, com dois ventiladores axiais do sistema de refrigeração da água de circulação.

O controlador PID possui a função de aumentar a temperatura do fluido de transferência de calor quando o sistema resfriar o fluido térmico abaixo da temperatura configurada para o ensaio. O controlador recebe o sinal de um PT100 instalado no absorvedor, realiza os cálculos com o sinal de entrada através de um algoritmo de controle PID, o qual as constantes foram calculadas utilizando a função de auto-tuning, e libera o novo sinal de saída através de modulação por largura de pulso para o relé de estado sólido, que energiza a resistência. A Fig. (6.15) mostra o controlador PID e o relé de estado sólido utilizados neste trabalho.

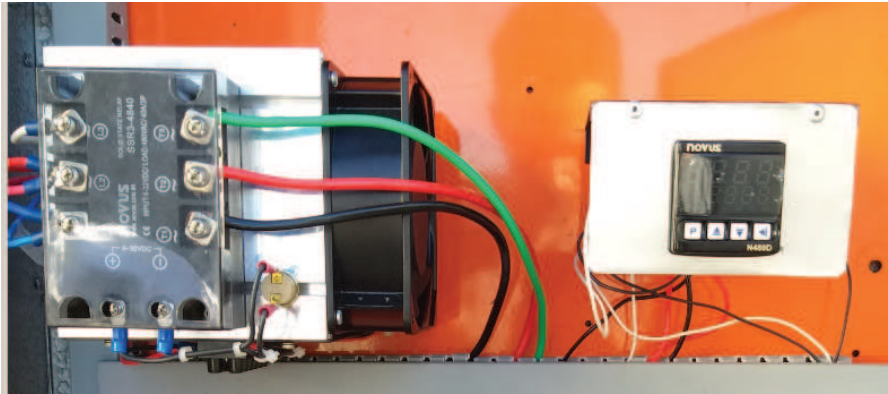


Figura 6.15 - Controlador PID e relé de estado sólido.

6.2.5 Controle e Medição de Vazão

O controle da vazão do fluido térmico é realizado através de um sistema composto de um inversor de frequência, um motor de indução e uma bomba. Através do teclado do inversor ajusta-se a frequência do sinal de tensão elétrica do motor de indução, variando assim, a rotação da bomba e a vazão do fluido térmico. A Fig. (6.16) apresenta o inversor, motor e bomba utilizados na bancada de testes.



(a) Inversor de frequência



(b) Motor de indução e bomba

Figura 6.16 – Equipamentos do sistema de controle de vazão do fluido de trabalho

Inicialmente a medição da vazão do fluido de transferência de calor foi realizada por um medidor do tipo vortex, marca ABB, instalado logo após a bomba de circulação do fluido de transferência de calor. Após a realização de alguns testes com o medidor de vazão verificou-se que o mesmo não estava medindo corretamente, pois estava parametrizado fora da faixa de vazão desejada. O medidor ABB foi substituído por um medidor analógico da RCM Industries. A Fig. (6.17) mostra os medidores de vazão utilizados na bancada.



Figura 6.17 - Medidores de vazão utilizados na bancada de testes.

6.2.6 Fluido de transferência de calor

O fluido de transferência de calor utilizado no concentrador é o Paratherm HE. Trata-se de um óleo mineral parafínico, incolor e sem cheiro, que possui uma faixa de operação de 3 °C a 310 °C. As principais características do Paratherm HE são apresentadas na Tab. (6.1).

Tabela 6.2 - Principais propriedades do fluido de transferência de calor Paratherm HE.

Propriedades	Características a 20 °C	Características a 100 °C
Massa específica (kg/m ³)	863	811
Viscosidade dinâmica (mPa-s)	90	5,2
Calor específico (kJ/kg K)	1,9	2,2
Condutividade térmica W/(m K)	0,132	0,126

6.2.7 Sensores de temperatura

As temperaturas de entrada e saída do coletor solar foram medidas continuamente através de dois sensores resistivos de temperatura, do tipo PT100, classe AA, a quatro fios, que foram inseridos no circuito hidráulico em uma conexão tê, com tampa rosqueada, conforme mostra a Fig. (6.18).

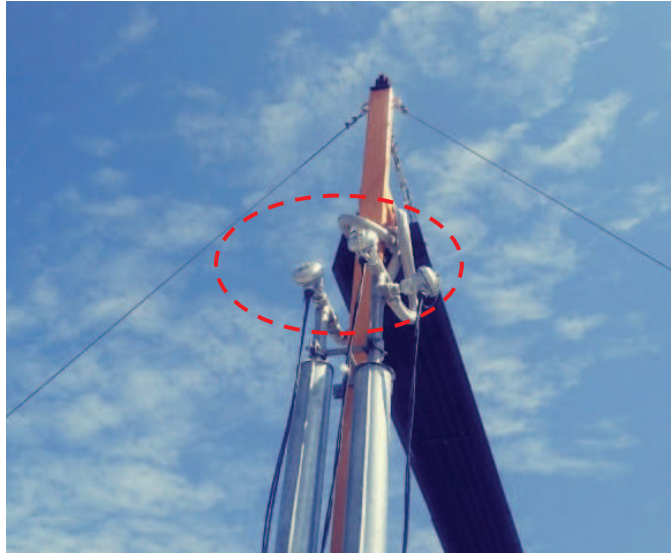


Figura 6.18 - Sensores de temperatura instalados na entrada e saída do absorvedor.

6.2.8 Estação meteorológica

A estação meteorológica possui dois piranômetros, modelo CMP21, um para medição da irradiância solar global e o segundo para a medição da componente difusa, ambas no plano horizontal. Uma esfera de sombreamento é instalada em cima do segundo sensor para impedir a passagem da radiação direta, o que faz que esse sensor meça somente a radiação difusa. A medição da irradiância direta é realizada por um pireliômetro, modelo CHP1. Os três sensores estão fixos em um rastreador solar Solys 2, conforme mostra a Fig. (6.19).



a) Piranômetros

b) Pireliômetro

c) Rastreador solar

Figura 6.19 – Equipamentos de medição de radiação da estação meteorológica.

Além de possuir outros sensores para medições climatológicas (temperatura ambiente, direção e velocidade do vento, etc), esta estação está conectada à unidade de aquisição e registro dos dados do Laboratório de Energias Renováveis. As principais características dos sensores são apresentadas na Tab. 6.2.

Tabela 6.3 - Resumo dos sensores da estação meteorológica.

Grandeza medida	Sensor	Precisão
Radiação solar global	CMP21	< 2,0 %
Radiação solar difusa	CMP21	< 2,0 %
Radiação solar direta	CHP1	±1,0 %
Rastreador	Solys 2	<0,02°
Velocidade do vento	Windsensor FIRT CLASS	±1%

6.2.9 Unidade de Aquisição e Registro de Dados

A unidade de aquisição e registro dos dados utilizada é o *Agilent 349070A* cuja comunicação com o computador é realizada através do protocolo RS232. O software *Agilent Benchlink Data Logger 3* opera simultaneamente com a unidade de aquisição fazendo upload dos dados medidos.

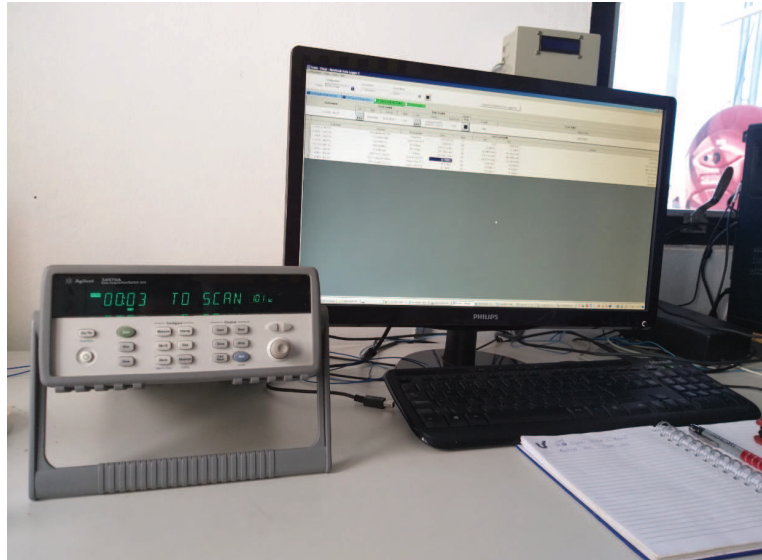


Figura 6.20 - Unidade de aquisição e registro de dados e computador utilizados nos testes.

6.3 MÉTODOS DE ENSAIO

Os ensaios para determinação do desempenho térmico foram baseados na norma E905-83 e complementados pelas normas EN 12975-2, ISO 9806 e ASHRAE 93. O método de ensaio contém procedimentos para medir o desempenho térmico de um coletor para certas condições bem definidas. Exceto quando indicado, estas condições devem existir durante um período de tempo igual a duas vezes o tempo de resposta do coletor antes de cada ensaio, e para a duração de cada ensaio, que deve ser superior a 5 minutos ou a metade do tempo de resposta. As condições de estado quase estacionário serão ditas existir quando os requisitos forem satisfeitos:

1) A temperatura de entrada do fluido no concentrador T_{fe} , deve variar menos de $\pm 0,2$ °C ou $\pm 1,0\%$ do valor de ΔT_a , o que for maior, durante o tempo especificado antes e durante cada teste;

2) A diferença de temperatura entre a entrada e a saída do concentrador, ΔT_a , deve variar menos de $\pm 0,4$ °C ou $\pm 4\%$ do valor de ΔT_a , o que for maior, durante os períodos especificados antes e durante cada teste;

4) A variação da irradiância direta e global deve ser inferior a $\pm 4\%$ durante os períodos especificados antes e durante cada ensaio;

5) A variação máxima permitida na temperatura ambiente para condições de regime quase-estacionário deve ser de $\pm 2,0$ °C;

6) A velocidade média do vento em todo o concentrador deve ser inferior a 4,5 m/s em todas as condições de estado quase-estacionário, a menos que se possa demonstrar que os efeitos de ventos que excedem este requisito são indistinguíveis de outras imprecisões de medição;

Antes da realização dos ensaios devem ser efetuadas as seguintes ações:

1) As superfícies dos espelhos expostas ao ambiente devem ser limpas no início de cada dia de teste de acordo com os procedimentos recomendados pelo fabricante. O método de ensaio utilizado para a limpeza deve ser comunicado na íntegra;

2) A localização geográfica (latitude e longitude) do concentrador deve ser determinada e comunicada com uma precisão de $\pm 0,1^\circ$. Se for o caso, a orientação de qualquer eixo fixo do concentrador deve ser medida com uma precisão de $\pm 0,1\%$ e ser comunicada.

3) O pirheliômetro e o piranômetro devem ser inspecionados no início de cada dia, a superfície externa do vidro deve ser limpa e seca se houver sujeira ou umidade. Qualquer evidência de umidade ou detritos no interior do instrumento deve ser causa suficiente para sua remoção do serviço;

4) O rastreador do pirheliômetro deve ser verificado e ajustado periodicamente ao longo do dia do teste para o alinhamento adequado.

6.3.1 Tempo de Resposta

O primeiro procedimento é chamado de tempo de resposta. É definido como o tempo necessário para que a diferença entre a temperatura de entrada e saída do absorvedor, ΔT_a , aumente para 90% do seu valor em condições de regime quase-estacionário, depois que o absorvedor seja exposto à irradiação.

O tempo de resposta é determinado pela repentina irradiação de um do absorvedor do LFR da seguinte forma: primeiramente deve-se desfocar a radiação do absorvedor do LFR. Depois, deve-se ajustar a temperatura de entrada do fluido de transferência de calor, T_{fe} , para dentro de $\pm 10^\circ\text{C}$ da temperatura ambiente, ou a menor temperatura de funcionamento possível, o que for maior, enquanto que a circulação do fluido através do concentrador, na taxa de massa especificada, seja mantida até que o concentrador alcance as condições de regime quase estacionário. Então, rapidamente, os espelhos foram movimentados para que o absorvedor seja totalmente irradiado.

6.3.2 Modificador de Ângulo de Incidência

O segundo procedimento tem como objetivo gerar dados modificadores do ângulo de incidência, $IAM(\theta)$, suficientes para caracterizar o desempenho térmico do concentrador em toda a gama de ângulos de funcionamento real que serão encontradas. Segundo a norma, a faixa de dados angulares necessários é influenciada pelo tipo de concentrador e orientação (por exemplo, norte-sul, leste-oeste ou eixo polar).

Yanga et al. (2015) salientam que, atualmente, vários estudos estão em andamento no que diz respeito ao número mínimo de dias de medição e tamanho de passo de ângulo máximo para o IAM, para ser capaz de determinar os parâmetros térmicos e ópticos de forma confiável, que permitam uma previsão precisa do rendimento anual. Uma análise completa do comportamento do IAM geralmente pode ser obtida por uma coleta contínua de dados de 6 a 12 meses de operação.

6.4 CÁLCULOS

6.4.1 Tempo de Resposta

O tempo de resposta é o tempo, t , necessário para alcançar a condição dada pela Eq. (6.1):

$$(\Delta T_{a,t} - \Delta T_{a,f}) / (\Delta T_{a,i} - \Delta T_{a,f}) = 0,10 \quad (6.1)$$

onde ΔT_a é a diferença de temperatura através do absorvedor, entre a entrada e a saída; $\Delta T_{a,i}$ é a diferença de temperatura entre a entrada do absorvedor e a saída no momento de condições iniciais de regime quase estacionário; $\Delta T_{a,f}$ é a diferença de temperatura entre a entrada e a saída do absorvedor no momento em que são atingidas as condições finais do regime quase estacionário; $\Delta T_{a,t}$ é a diferença de temperatura entre a entrada e a saída do absorvedor no tempo t .

O tempo de resposta será determinado pela repentina irradiação do absorvedor da seguinte forma: desviar os raios do absorvedor. Ajustar a temperatura de entrada do fluido de transferência de calor, T_{fe} , dentro de ± 10 °C da temperatura ambiente, ou à menor temperatura de funcionamento possível, o que for maior, enquanto que a circulação do fluido através do concentrador, na taxa de massa especificada, seja mantida até que o concentrador

alcance as condições de regime quase estacionário. Então, rapidamente, movimentar os espelhos de modo que a abertura do absorvedor seja totalmente irradiada.

6.4.2 Ângulo de Incidência

Se o ângulo de incidência, θ , da radiação solar direta sobre a abertura do concentrador não é medido, então ele deve ser calculado a partir dos ângulos de azimute (γ_s) e elevação solar (α_s) e a orientação do concentrador para cada ponto de dados usando as equações indicadas. A hora do dia a ser utilizada deve ser o centro do intervalo de tempo das observações que compõem o ponto de dados.

6.4.3 Taxa de Radiação Incidente no Concentrador

Para cada ponto de dados, a taxa de radiação incidente na abertura do concentrador é calculada a partir da área da abertura, da medição da irradiância solar direta normal e do ângulo de incidência medido ou calculado, usando a Eq. (6.2):

$$q_{inc} = G_{bN} A_a \cos\theta \quad (6.2)$$

onde q_{inc} é a taxa de radiação incidente na abertura do concentrador, G_{bN} é a irradiância solar direta normal, A_a é a área de abertura do concentrador e o θ é o ângulo de incidência.

O ângulo de incidência deve ser obtido para a hora do dia centrada no intervalo de tempo durante o qual as observações dos pontos de dados são medidas.

6.4.4 Taxa de Transferência de Calor para o Fluido

Para cada ponto de dados, a taxa de transferência de calor para o fluido de trabalho é calculada a partir da Eq. (6.3):

$$\dot{Q} = (\dot{m} C_p) \Delta T_a \quad (6.3)$$

onde \dot{Q} é a taxa de transferência de calor para o fluido de trabalho, \dot{m} é taxa de massa, C_p é o calor específico do fluido de trabalho e ΔT_a é a diferença de temperatura do fluido de trabalho entre a entrada e a saída do absorvedor. ΔT_a é calculada a partir da Eq. (6.4):

$$\Delta T_a = T_{fs} - T_{fe} \quad (6.4)$$

onde T_{fs} é a temperatura do fluido de trabalho na saída do absorvedor e T_{fe} é a temperatura do fluido de trabalho na entrada do absorvedor. Os valores utilizados devem ser as médias das observações para cada variável tomada ao longo do intervalo de tempo.

6.4.5 Modificador do Ângulo de Incidência

Para cada ângulo de incidência em que o procedimento é realizado, calcula-se a razão entre a taxa de transferência de calor para o fluido de trabalho, \dot{Q} , e a taxa de radiação incidente sobre a abertura concentrador, através da Eq. (6.5):

$$\eta(\theta_L, \theta_T) = \dot{Q} / (G_B A_a) \quad (6.5)$$

onde $\eta(\theta_L, \theta_T)$ é a eficiência para os ângulos de incidência definidos, \dot{Q} é a taxa de transferência de calor para o fluido de trabalho, G_B é irradiância solar direta.

Depois é realizado o cálculo do Modificador do Ângulo de Incidência para cada ângulo de incidência e a relação à proporção de incidência normal. A razão usada deve ser calculada a partir dos dados obtidos no mesmo dia, através da Eq. (6.6):

$$K(\theta_L, \theta_T) = \eta(\theta_L, \theta_T) / \eta(\theta_L = \theta_T = 0) \quad (6.6)$$

onde K é o modificador do ângulo de incidência (IAM) unidimensional, $\eta(\theta_L, \theta_T)$ é a eficiência para um ângulo de incidência θ variável e $\eta(\theta_L = \theta_T = 0)$ a eficiência para um ângulo de incidência normal. A ISO 9806 permite utilizar outro ângulo de incidência de referência, caso não seja possível determinar a incidência normal.

Diferente do concentrador de calha parabólica, o IAM do concentrador Fresnel linear é bidimensional e não pode ser descrito por um único polinômio na dependência de um ângulo de incidência. Em vez disso, segundo a EN12795-2 e a ISO 9806, ele pode ser fatorado de acordo com a Eq. (6.7):

$$K_B(\theta_L, \theta_T) = K_T(\theta_T)K_L(\theta_L) \quad (6.7)$$

onde K_B é o modificador do ângulo de incidência bidimensional, K_T é o modificador ângulo de incidência em relação ao plano transversal e K_L o modificador do ângulo de incidência em relação ao plano longitudinal. Por sua vez, leva à necessidade de determinar as curvas de IAM para cada ângulo de incidência possível ao longo dos principais eixos. Segundo a EN 12975-2 e a ISO 9806, utiliza-se a Eq. (6.8) para obter a correlação entre θ , θ_L e θ_T :

$$\tan^2 \theta = \tan^2 \theta_L + \tan^2 \theta_T \quad (6.8)$$

A relação dos ângulos e os planos do concentrador é apresentada na Fig. (6.21).

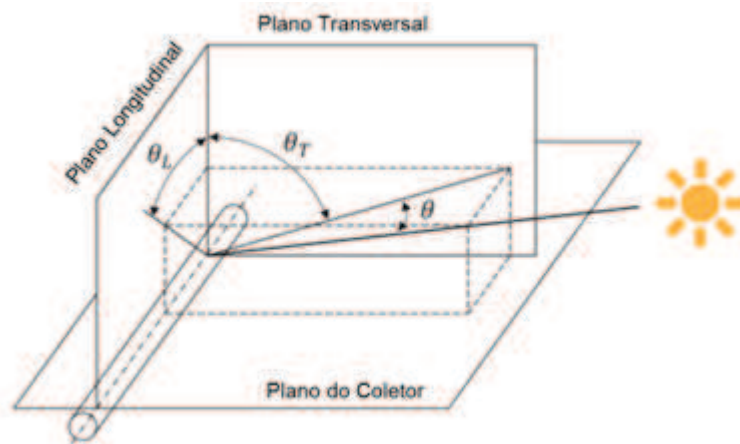


Figura 6.21 - Ilustração da relação dos ângulos e os planos do concentrador.

Fonte: Adaptado de Hertel (2016).

6.5 SIMULAÇÃO

A simulação óptica foi utilizada como complemento aos procedimentos experimentais. Para determinar a influência do modificador do ângulo de incidência no desempenho do concentrador foi utilizado o programa de traçado de raios Tonatiuh.

Os dados de entrada necessários para as simulações são: definição do modelo de distribuição da irradiância do Sol, os parâmetros geométricos e óticos do concentrador, as coordenadas de localização e o número de raios.

6.5.1 Definição do Formato do Sol

O parâmetro *Sunshape* descreve o perfil de radiação da componente direto da radiação solar. O software permite definir o formato do Sol (*sunshape*) através de dois modelos: *Pillbox* ou *Buie*. O modelo *Pillbox* considera o Sol como um disco sólido com intensidade de emissão de radiação uniforme para todas as posições do disco. De acordo com Cole (2015), este modelo representa uma melhoria em relação ao modelo de fonte pontual, mas ainda não considera a distribuição de potência ao longo do disco solar e nem que, devido à dispersão pela ação da atmosfera terrestre, haja radiação proveniente de posições externas àquela representada pelo disco solar.

O modelo mais aceito atualmente e que produz resultados mais próximos às medições realizadas é o chamado modelo de *Buie* (BUIE; MONGER; DEY, 2003). Este modelo foi desenvolvido com base em uma vasta coleção de medições da distribuição da intensidade da radiação solar realizado pelo Laboratório Lawrence Berkeley (LBL) e pelo Centro Aeroespacial Alemão (DLR). Com estas medições, foi possível determinar vários perfis de radiação que variam em função de um parâmetro que foi chamado de taxa de radiação circunsolar (*CSR*).

6.5.2 Geometria

Ao criar uma forma geométrica, deve-se saber que Tonatiuh trabalha com nós. Cada componente do sistema é associado a um nó diferente chamado *rootnode* que, uma vez criado, pode ser alterado em seu nome e suas coordenadas para colocá-lo em uma determinada posição. Depois que o *rootnode* tenha sido criado, ele deve estar associado a uma geometria.

Para isso, outro tipo de nó chamado *TShapeKit* é usado, o que permite que ele seja associado a uma geometria.

O LFR contém 14 fileiras de espelhos de 300 mm de largura cada, com um concentrador secundário tipo cavidade de 200 mm de abertura e situado a 3 m de altura, em relação ao plano contendo os eixos dos espelhos. A Fig. (6.22) apresenta o aspecto do programa Tonatiuh com a simulação do concentrador Fresnel linear.

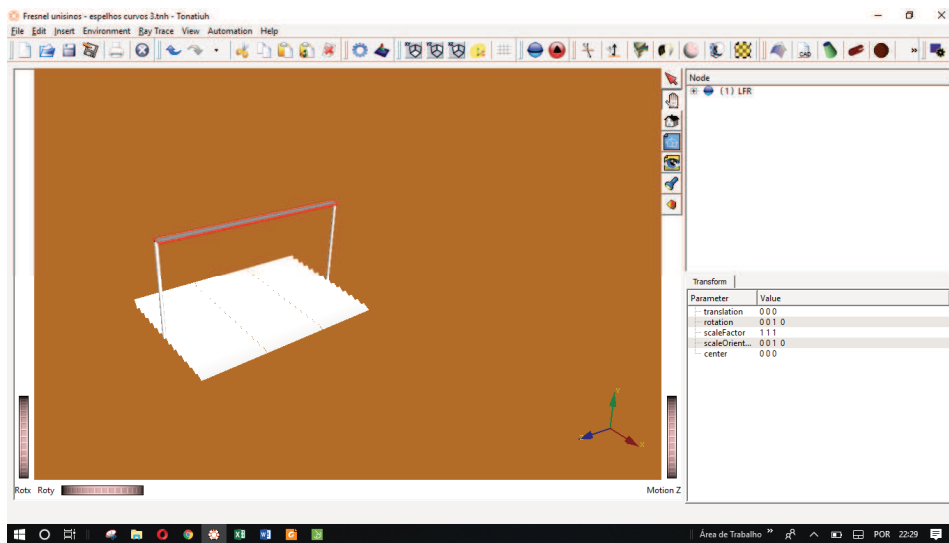


Figura 6.22 - Aspecto do programa Tonatiuh com a definição da geometria do LFR.

Uma vez que o *TShapeKit* é selecionado, escolhe-se a geometria desejada e através de uma janela de comando define-se os parâmetros dessa geometria. Uma vez que o nó *TShapeKit* tenha sido adicionado, características ópticas também podem ser atribuídas ao material usando a opção *Specular Standard Material* e *Basic Refractive Material*.

6.5.3 Qualidade Óptica

A qualidade óptica de um sistema refere-se às propriedades ópticas que este possui. O parâmetro que mais influência é o erro óptico. Isso reúne os diferentes erros existentes associados a um desvio normal do sistema. Os erros associados a um sistema reflexivo são erros de inclinação locais (deformações devido à estrutura de suporte e ondulação da superfície dos espelhos) e erros de rastreamento. O Tonatiuh ainda considera outros fatores como refletividade, transmissividade ou emissividade e outros que ajudam a definir o perfil óptico completo. Os parâmetros utilizados nos espelhos são apresentados na Fig. (6.23).

Trough_Parabola		Specular_Standard_Material	
Parameter	Value		
m_reflectivity	1		
m_sigmaSlo...	2		
m_distributi...	NORMAL		
m_ambient...	0.2 0.2 0.2		
m_diffuseC...	0.80000001 0.80000001 0.80000001		
m_specular...	0 0 0		
m_emissive...	0 0 0		
m_shininess	0.2		
m_transpar...	0		

Figura 6.23 – Configuração dos parâmetros ópticos dos espelhos.

6.5.4 Simulação

Uma vez configurado o sistema geométrico e óptico, a simulação é realizada. Para isso, o primeiro passo foi escolher o número de raios a serem lançados na caixa de opções de rastreamento de raios. As simulações foram realizadas com 20.000.000 de raios. Depois disso, foram determinados os valores dos dados geográficos, de data e de horário.

Feito isso, pode-se escolher o tipo de armazenamento do arquivo que o Tonatiuh gera, entre o arquivo ASCII, JPG ou PNG. Também se escolhe a superfície a ser analisada, na qual o programa fornecerá uma distribuição do fluxo.

7 RESULTADOS

Neste capítulo serão descritos e comentados os resultados obtidos na montagem da bancada, nos testes e simulações do refletor Fresnel linear instalado na parte superior do prédio C01 da Universidade do Vale dos Sinos.

7.1 PERFIL DA RADIAÇÃO REFLETIDA PELOS ESPELHOS

Após a colagem das bases no espelho, verificou-se o formato da radiação refletida por uma fileira de espelhos (Fig. 7.1). Os espaçamentos das bases coladas nos espelhos geraram ondulações nas superfícies dos espelhos que resultaram em uma radiação refletida com sinuosidades.

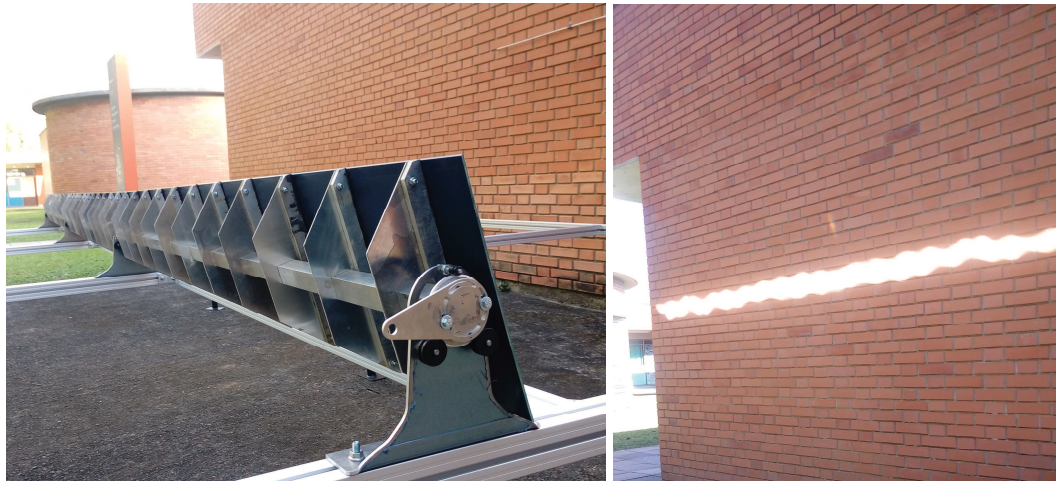


Figura 7.1– Fileira de espelhos montada com a estrutura de suporte (esquerda) e a radiação refletida por uma fileira de espelhos (direita).

7.2 TEMPO DE RESPOSTA

O tempo de resposta para o concentrador ensaiado atingir 90% da máxima variação de temperatura foi 5 min e 35 s. A Fig. (7.5) apresenta a variação da temperatura do fluido térmico na entrada e saída do absorvedor, bem como a temperatura ambiente no momento do ensaio.

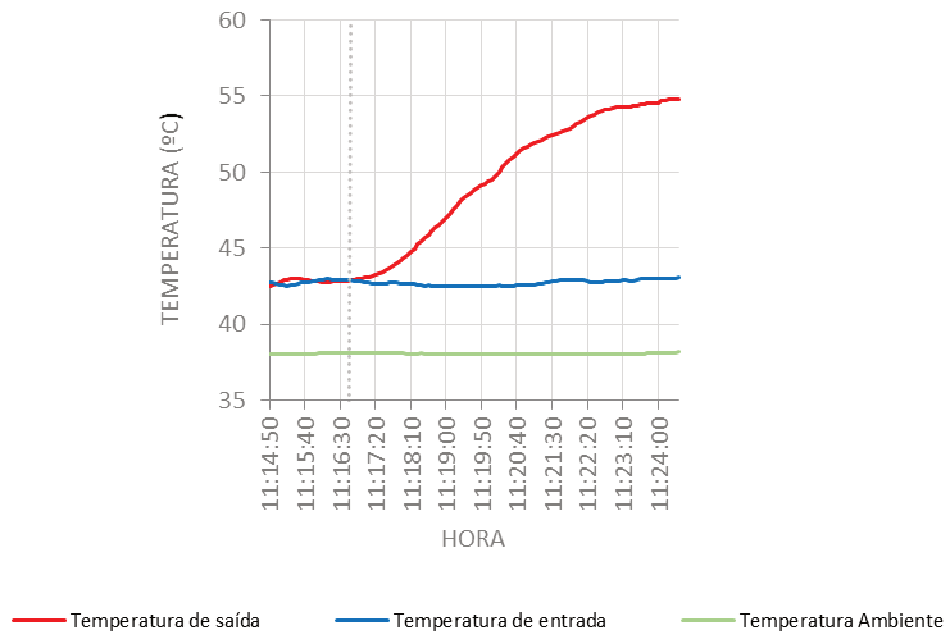


Figura 7.2 - Tempo de resposta do refletor Fresnel linear ensaiado.

7.3 LFR SEM O CONTROLE DE TEMPERATURA

O LFR operando sem o sistema de controle de temperatura apresentou um incremento de temperatura médio de aproximadamente 2 °C/min. A diferença de temperatura máxima (ΔT_a) do fluido de transferência de calor entre a entrada e a saída do concentrador foi de aproximadamente 8 °C. A Fig. (7.2) apresenta a variação da temperatura de entrada e saída do LFR operando sem o sistema de controle de temperatura. Cabe ressaltar que a temperatura de operação do concentrador foi limitada em 100 °C em função da temperatura máxima de operação do medidor de vazão analógico utilizado.

7.4 VARIAÇÃO DA VAZÃO DO FLUIDO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Utilizando o inversor de frequência foi possível variar a vazão do fluido de trabalho. O inversor configurado para 45 Hz, proporcionou uma vazão de 10 L/min e uma diferença de temperatura média no absorvedor de 18,04 °C. Com o aumento da frequência para 50 Hz, a vazão foi de 14 L/min e a diferença de temperatura foi de 7,7 °C.

7.5 CONTROLE DE TEMPERATURA DE ENTRADA

O sistema de controle mantém a temperatura de entrada aproximadamente constante. A variação máxima de temperatura durante o período do teste (13h48m - 15h03m) foi de 0,6 °C, mesmo com a irradiância direta normal variando 171 W/m². A Fig. (7.4) apresenta a variação da temperatura de entrada do absorvedor e a irradiância solar direta normal.

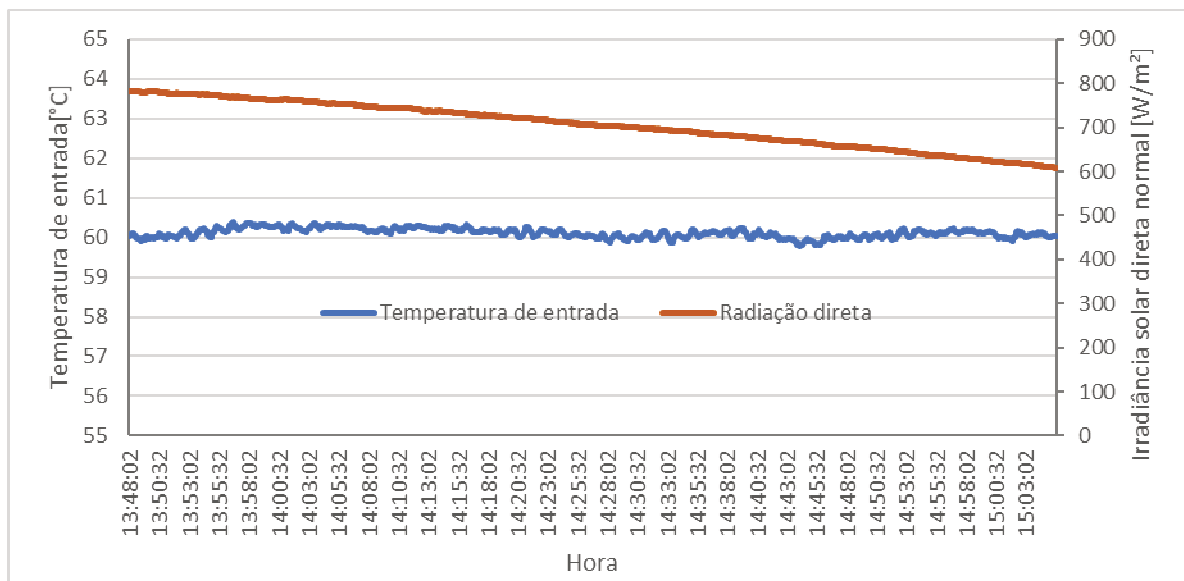


Figura 7.5 – Variação da temperatura de entrada do absorvedor e a irradiância solar direta normal.

7.6 EFICIÊNCIA

O ensaio para a determinação do rendimento instantâneo, com controle de temperatura de entrada do absorvedor, foi realizado com a irradiância direta variando entre 882 W/m² e 900 W/m², isso é, aproximadamente 2%. A diferença de temperatura obtida entre a entrada e saída do concentrador variou entre 9,1°C e 9,7°C e a vazão mássica foi mantida em 0,3 kg/s.

Os resultados obtidos para a eficiência global do coletor variaram entre 27,5% e 28%. A Fig. (7.6) apresenta a variação do rendimento e a irradiância direta normal durante o ensaio. Já a Fig. (7.7) apresenta as temperaturas no absorvedor durante o ensaio.

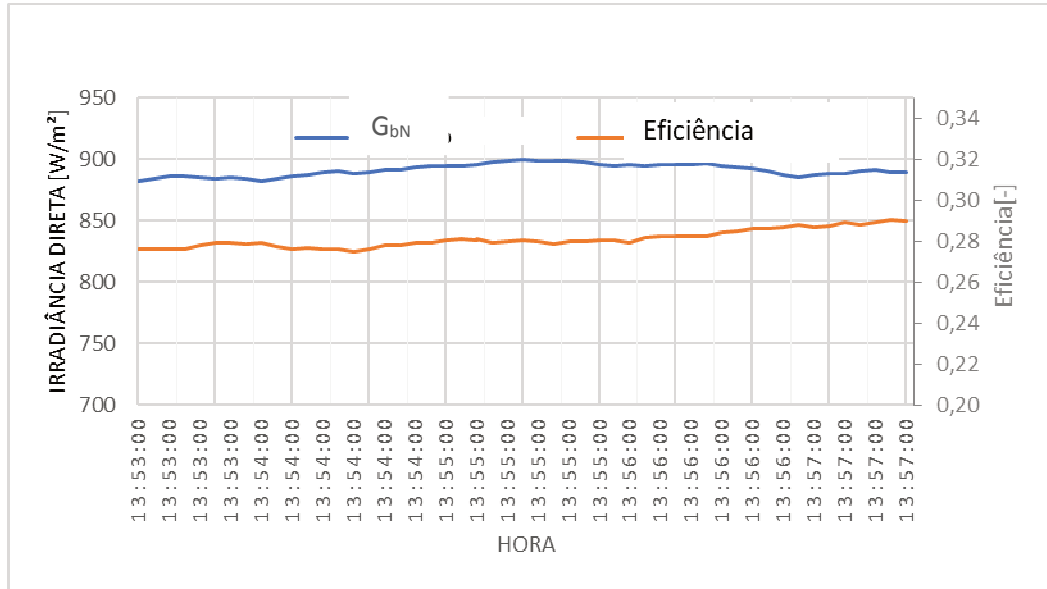


Figura 7.6 - Curva de eficiência do LFR.

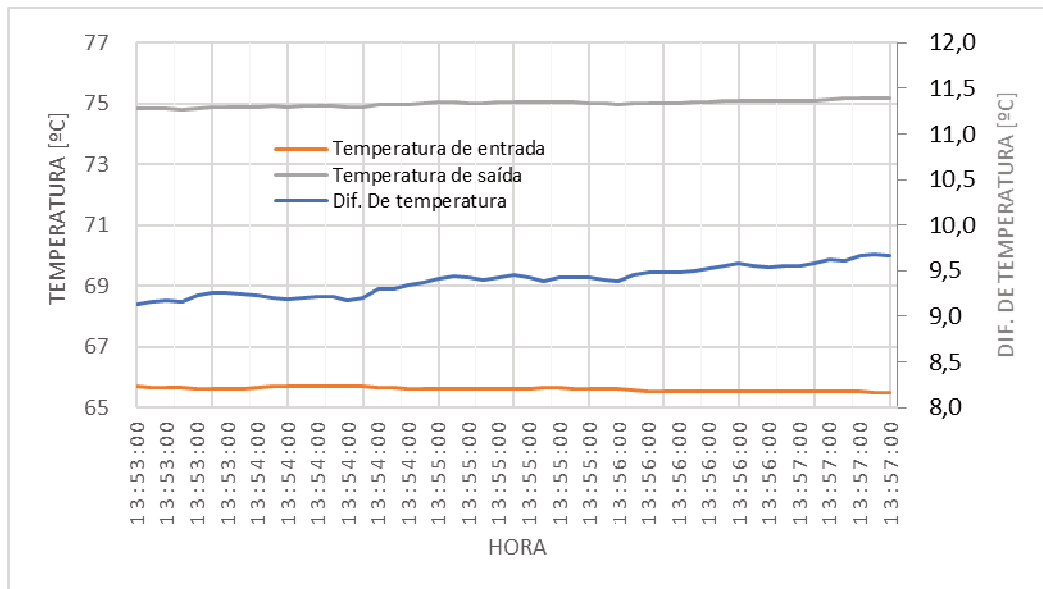


Figura 7.7 - Temperaturas de entrada e saída no absorvedor.

7.7 MODIFICADOR DE ÂNGULO DE INCIDÊNCIA

Baseado nas simulações realizadas no software Tonatiuh, foram determinadas as curvas do IAM transversal e longitudinal. A Fig. (7.8) mostra, graficamente, o

comportamento do IAM longitudinal em função do ângulo de incidência e a Fig. (7.9) mostra, graficamente, o comportamento do IAM transversal em função do ângulo de incidência.

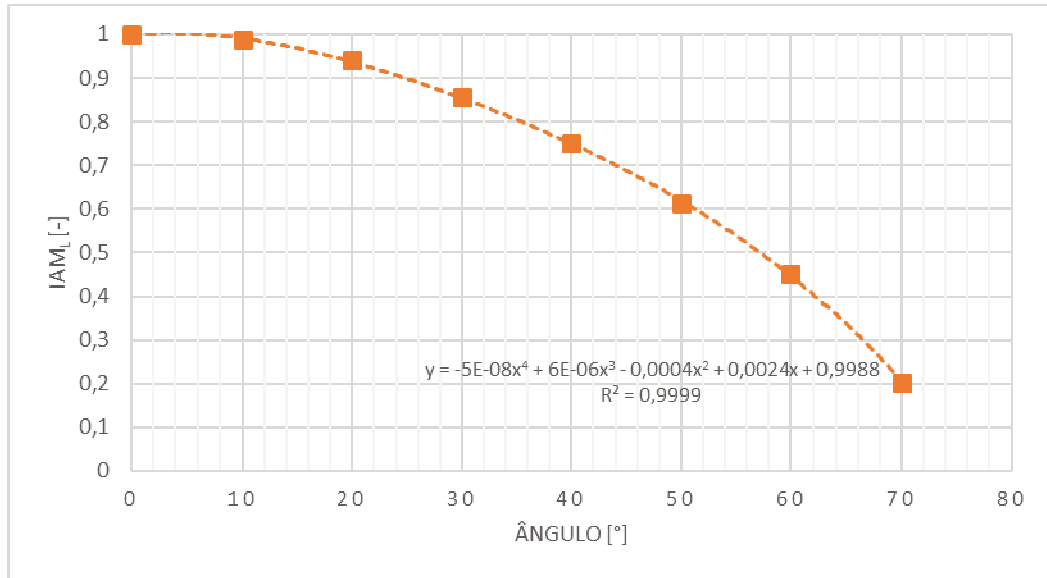


Figura 7.8 - Curva do modificador de ângulo de incidência longitudinal (IAM_L) determinada com o software Tonatiuh.

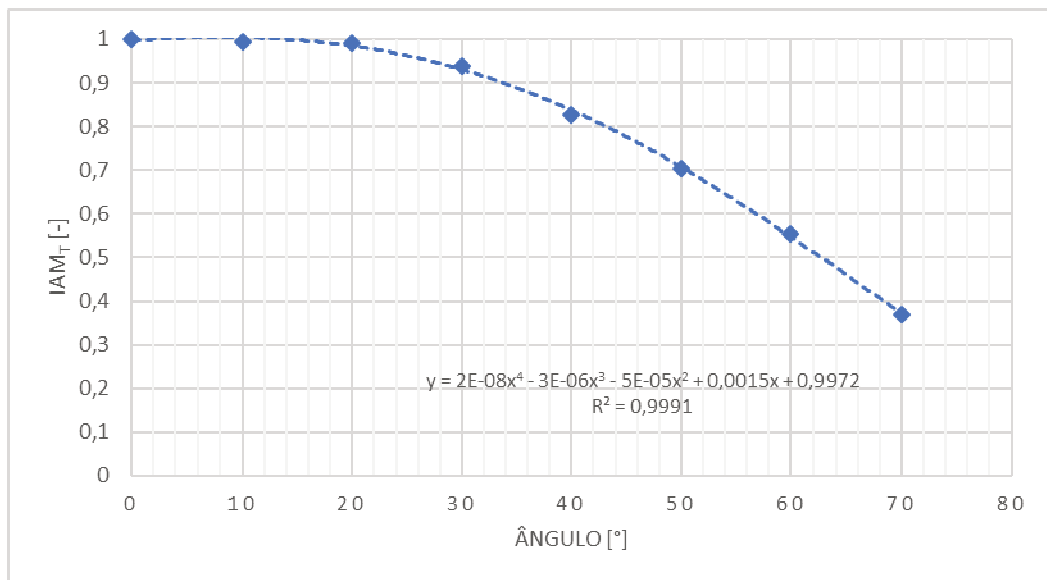


Figura 7.9 - Curva do modificador de ângulo de incidência transversal (IAM_T) determinada com o software Tonatiuh.

A Fig. (7.10) mostra a curva do IAM para três dias diferentes (21 de março, 21 de junho e 21 de dezembro), representando o equinócio de outono, o solstício de inverno e o

solstício de verão. Observa-se que os maiores valores estão entre 10 h e 15 h do dia 21 de dezembro, com valores entre 93% e 95%. Para o mesmo período horário (10 h às 15 h), os valores de rendimento óptico ficaram entre 18% e 24%. Em 21 de junho, observa-se que o IAM apresenta valores extremamente baixos onde a eficiência máxima obtida neste dia foi de 25%.

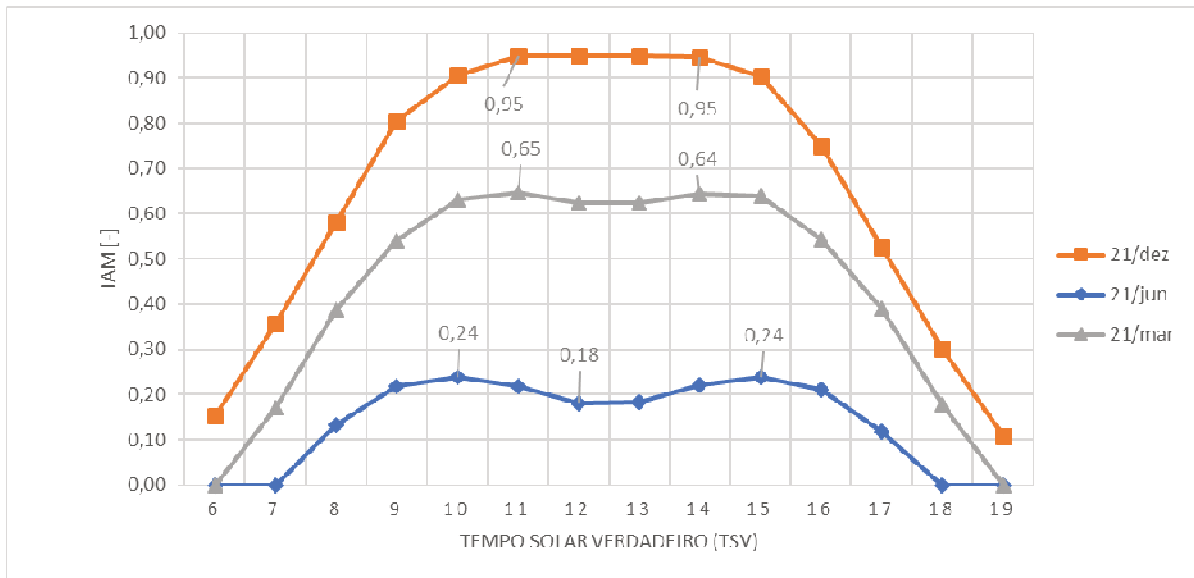


Figura 7.10 - Modificador de ângulo de incidência para três dias diferentes (21 de Março, 21 de Junho e 21 de dezembro).

A maior diferença do IAM ocorreu entre os dias 21 de dezembro (solstício de verão) e 21 de junho (inverno). Esta diferença de valores do IAM apresentada ocorre devido a posição solar. O ângulo zênite no dia 21 de dezembro é de $7,85^\circ$ enquanto que em 21 de junho, o ângulo de zênite é de $53,3^\circ$, às 12 horas. Quando maior esse ângulo, maior será a perda óptica. No 21 de junho, as perdas de final de linha são extremamente elevadas, pois somente 30% do absorvedor está recebendo os raios refletidos pelos espelhos, como mostrado na Fig. 7.11b, enquanto que no dia 21 de dezembro todo o absorvedor está recebendo os raios refletidos (Fig. 7.11a). Essa parte do comprimento do absorvedor que não é irradiada e não contribui para a produção de calor é um dos fatores que afetam o desempenho óptico do LFR. No dia 09 de abril foi verificado que aproximadamente 2 metros do receptor não estavam sendo irradiados pelo campo de espelhos (Fig. 7.12).

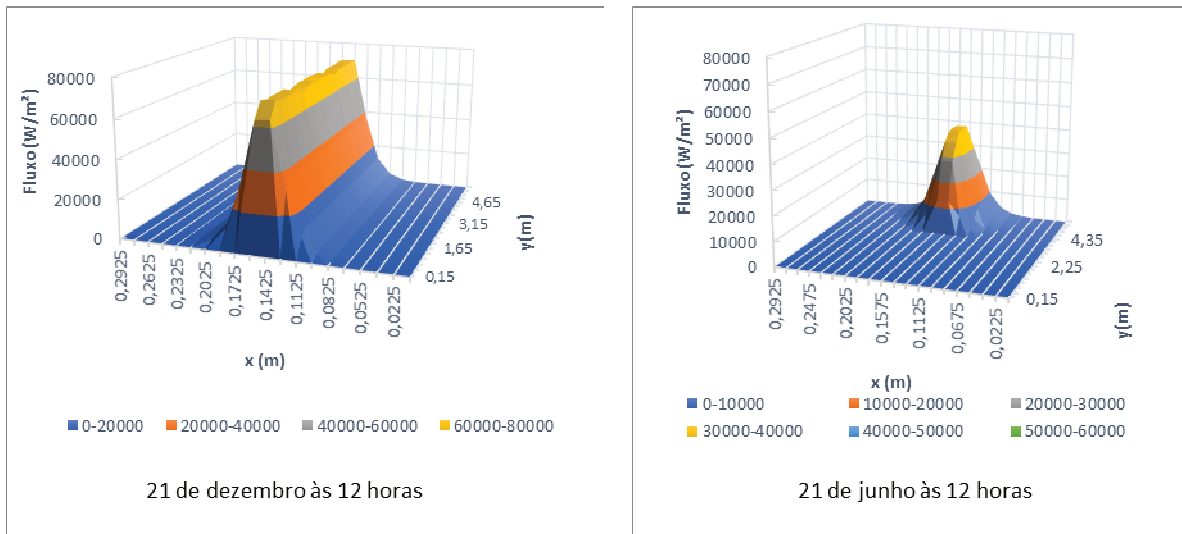


Figura 7.11 - Distribuição do fluxo no plano do absorvedor para o dia 21 de dezembro (a) e 21 de junho (b), às 12 horas.



Figura 7.12 –Parte do absorvedor não iluminado pela radiação refletida pelos espelhos no dia 09 de abril.

8 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi apresentado o desenvolvimento de uma bancada de testes para análise experimental de um concentrador solar tipo refletor Fresnel linear. Para isso, inicialmente, foi feita a montagem do LFR e, posteriormente, foi construída uma bancada experimental constituída do concentrador, equipamentos de medição e controle de temperatura e vazão. A análise deste trabalho foi dividida em duas partes: montagem e os testes.

A montagem dos espelhos (colagem na estrutura de suporte, fixação do eixo de rotação e fixação nos mancais) foi sendo realizada em paralelo à construção da estrutura mecânica do LFR e à finalização do projeto e construção do circuito hidráulico da bancada. O sistema utilizado para a fixação dos espelhos mostrou-se adequado para manter as curvaturas com precisão satisfatória e à exposição ao tempo, sem apresentar até o momento qualquer tipo de degradação. Entretanto, a montagem dos espelhos através dessa técnica é muito demorada. Isto não se apresentou como um grande problema para o caso do LFR desenvolvido, mas para aplicação industrial, este processo de fixação e curvatura precisará ser otimizado.

Depois do circuito hidráulico ter sido entregue, os equipamentos de medição e controle da bancada foram sendo montados e conectados ao sistema de aquisição de dados. Após a realização dos testes de funcionamento desses sistemas, a bancada ficou apta para a realização dos testes para determinação do desempenho térmico do LFR.

O primeiro teste realizado permitiu analisar a operação completa da bancada, desde o sistema de circulação do óleo térmico até o sistema da movimentação dos espelhos. Nesses primeiros testes foi verificado que o LFR operando em uma vazão de 0,36 kg/s e com irradiância direta normal em torno de 954 W/m², apresentou um incremento médio de temperatura na ordem de 2 °C/min, nas condições climáticas do dia do teste.

Posteriormente, o sistema de controle da temperatura de entrada do óleo térmico no absorvedor, constituído por um trocador de calor de placas resfriado a água/ar, um trocador de calor com circulação de água gelada e uma resistência elétrica para reaquecimento, acionada por um controlador PID, foi testado. O sistema conseguiu manter temperatura de entrada aproximadamente constante, apresentando uma variação máxima de temperatura durante o período do teste (13h48m - 15h03m) de 0,6 °C, mesmo com a radiação direta normal variando de 781 W/m² até 610 W/m². O controle mostrou-se suficientemente preciso para atender as

condições de controle de temperatura para realização de testes de tempo de resposta e de regime quase estacionário ($<1^{\circ}\text{C}$), conforme estabelecido pela ANSI/ASHRAE 93.

O teste de eficiência foi realizado com irradiância direta variando entre 882 W/m^2 e 900 W/m^2 . A diferença de temperatura obtida entre a entrada e saída do concentrador variou entre $9,1^{\circ}\text{C}$ e $9,7^{\circ}\text{C}$ e a vazão mássica foi mantida em aproximadamente $0,3\text{ kg/s}$. Os resultados obtidos para a eficiência global do concentrador variaram entre $27,5\%$ e $28,0\%$. Estes valores foram relativamente baixos comparados aos sistemas testados por Jaramillo et al. (2015) e Song et al. (2015), que obtiveram $43,97\%$ e $55,7\%$, respectivamente.

Um fator importante que reduz a eficiência é o tipo de tinta utilizada no absorvedor. Segundo estudos realizados por Singh, Sarviya e Bhagoria (2010), que compararam o desempenho térmico com absorvedor revestido com pintura preta comum e com superfície seletiva de níquel, a eficiência térmica apresentou uma diferença entre $11,6\%$ e $13,9\%$. No caso estudado, o uso de tinta seletiva poderia contribuir para atingir uma eficiência próxima ou superior a 40% . Outros fatores que também contribuíram para a redução da eficiência foram: erros geométricos dos espelhos (deformações devido à estrutura de suporte provocando ondulações da superfície, como observado anteriormente no Cap. 7), a presença de quatro espelhos quebrados/trincados, que não puderam ser substituídos durante os testes, as perdas finais de linha e a ausência de superfície transparente para minimização das perdas térmicas por convecção no absorvedor.

Também foram apresentados no presente trabalho os resultados de simulação óptica como complemento aos procedimentos experimentais. Uma vez que o desempenho e a avaliação do comportamento anual do concentrador necessitam de um período de 6 a 12 meses e o período de teste é limitado, a variação do IAM foi determinada através de simulação, utilizando o Método Monte Carlo. Os resultados da simulação do comportamento anual mostraram que a maior diferença do IAM ocorreu entre os dias 21 de dezembro (95%) e 21 de junho (18%). Esta diferença de rendimento apresentada ocorre devido a inclinação solar.

O ângulo de zênite no dia 21 de dezembro é de $7,85^{\circ}$ enquanto que em 21 de junho, o ângulo de zênite é de $53,3^{\circ}$, às 12 horas. Esta maior inclinação da posição do Sol é responsável por uma grande perda óptica. No 21 de junho, as perdas finais são extremamente elevadas, pois somente 30% do absorvedor está recebendo os raios refletidos pelos espelhos enquanto que no dia 21 de dezembro todo o absorvedor está recebendo os raios refletidos. Este tipo de perda é mais representativa para linhas de absorvedores com comprimentos menores que 100 m .

8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos estudos realizados, novas propostas para continuidade do trabalho são sugeridas:

a) Análise do desempenho térmico do atual concentrador adequando o medidor de vazão para uma maior faixa de vazões e temperaturas;

b) Análise do desempenho térmico do concentrador utilizando uma placa de vidro no concentrador secundário, a fim de minimizar as perdas de radiação e convecção e, assim, aumentar a temperatura do fluido de trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Geraldo Samuel Marques. Pesquisa e Desenvolvimento de um Sistema Termoelétrico do tipo Linear Fresnel Reflector. 2013. 86 f. Dissertação (Mestrado), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E905**: Standard Test Method for Determining Thermal Performance of Tracking Concentrating Solar Collectors. West Conshohocken, 2013.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 93**: Methods of Testing to determine the thermal performance of solar collectors. Atlanta, 1991.
- ANTHRO POWER. **Linear Fresnel reflector: based solar system: operations and maintenance manual**. Ministry of New and Renewable Energy. India, nov. 2014. Disponível em: <http://mnre.gov.in/file-manager/UserFiles/CST-Manuals/LFR_E.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2017.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **EN 12975-2**: Thermal solar systems and components - Solar collectors. Part 2: Test methods. Génova, 2006.
- BELTAGY, H.; SEMMAR D.; LEHAUT C.; SAID, N. Theoretical and experimental performance analysis of a Fresnel type solar concentrator. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 101, p.782-793, fev. 2017. Elsevier BV.
- BENYAKHLEF, S.; MERSA A.; MERROUNB, O.; BOUATEMA, A.; BOUTAMMACHTEA, N.; ALJA, S.; AJDADA, H.; ERREGUERAGUIA, Z.; ZEMMOURIA, E. Impact of heliostat curvature on optical performance of Linear Fresnel solar concentrators. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 89, p.463-474, abr. 2016. Elsevier BV.
- BERMEJO, P.; PINO, F. J.; ROSA, F. Solar absorption cooling plant in Seville. **Solar Energy**, [s.l.], v. 84, n. 8, p.1503-1512, ago. 2010. Elsevier BV.
- BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. Fundamentos da Termodinâmica. 8. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2013. 730 p.
- BUIE, D.; MONGER, A. G.; DEY, C. J. Sunshape distributions for terrestrial solar simulations. **Solar Energy**, v. 74, n. 2, p. 113–122, 2003.
- COLE, I. R. **Modelling CPV**. [s.l.] Loughborough University, 2015.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 4rd. ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, c2013. xxvi, 910 p.
- ELMAANAOU, Y.; SAIFAOU, D. Parametric analysis of end loss efficiency in linear Fresnel reflector. **2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)**, [s.l.], p.1-4, out. 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

Energia Heliotérmica. Disponível em: < <http://energiaheliotermica.gov.br/>> Acesso em: 02 dez. 2018.

FACÃO, J.; OLIVEIRA, A.C. Numerical simulation of a trapezoidal cavity receiver for a linear Fresnel solar collector concentrator. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 36, n. 1, p.90-96, 2011.

GOOGLE. **Google Earth.** Versão 7.1.7.2606. 2017. Nota (Detalhe do Prédio C01 da Universidade do Vale do Rio do Sinos).

GÜNTHER, Matthias. Linear Fresnel Technology. Disponível em: <<http://www.energy-science.org/bibliotheque/cours/1361468614Chapter%2006%20Fresnel.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2016.

HEIMSATH, A. et al. Quantifying Optical Loss Factors of Small Linear Concentrating Collectors for Process Heat Application. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 48, p.77-86, 2014. Elsevier BV.

HOFER, A.; VALENZUELA, L.; JANOTTE, N.; BURGALETA, J.I.; ARRAIZA, J.; MONTECCHI, M.; SALLABERRY, F.; OSÓRIO, T.; CARVALHO, M.J.; ALBERTI, F.; KRAMER, K.; HEIMSATH, A.; PLATZER, W.; SCHOLL, S. State of the art of performance evaluation methods for concentrating solar collectors. **Solarpaces 2015**, [s.l.], p.1-7, 2016. AIP Publishing.

HONGN, M.; FLORES-LARSEN, S.; GEA, M.; ALTAMIRANO, M.; Least square-based method for the estimation of the optical end loss of linear Fresnel concentrators. **Solar Energy**, [s.l.], v. 111, p.264-276, jan. 2015. Elsevier BV.

HORTA, P.; OSÓRIO, T. Optical Characterization Parameters for Line-focusing Solar Concentrators: Measurement Procedures and Extended Simulation Results. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 49, p.98-108, 2014. Elsevier BV.

Industrial Solar. Disponível em: < <http://www.industrial-solar.de/>> Acesso em: 22 mar. 2017.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). **Evaluación del potencial de energía solar termoeléctrica.** Madrid, 2011. Disponível em: < http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e12_termoelectrica_A_fd47d41f.pdf> Acesso em: 18 dez, 2016.

International Energy Agency. **Technology Roadmap: Solar Thermal Electricity**, 2014 Edition. OCECD/IEA, Paris.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9806:** Solar energy - Solar thermal collectors - Test methods. Geneva, 2013.

JARAMILLO, O. A. et al. A Modular Linear Fresnel Reflecting Solar Concentrator for Low-Enthalpy Processes. **Renewable Energy in the Service of Mankind Vol II**, [s.l.], p.949-960, 30 dez. 2015. Springer International Publishing.

KALOGIROU, S. A. **Engenharia de Energia Solar: Processos e Sistemas.** 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. 864 p.

KALOGIROU, S. A. Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, [s.l.], v. 30, n. 3, p.231-295, jan. 2004. Elsevier BV.

MCINTIRE, W. R. Factored approximations for biaxial incident angle modifiers. **Solar Energy**, [s.l.], v. 29, n. 4, p.315-322, 1982. Elsevier BV

MILLS, D.R.; MORRISON, G.L. Compact linear Fresnel reflector solar thermal power plants. **Solar Energy**, vol. 68, no. 3, pp. 263-283

MOGHIMI, M.A.; Craig, K.J.; Meyer, J.P., 2016. Simulation-based optimization of a linear Fresnel collector mirror field and receiver for optical, thermal and economic performance. **Solar Energy**, vol. 153, pp. 655-678.

MONTES, M. J. et al. Performance model and thermal comparison of different alternatives for the Fresnel single-tube receiver. *Applied Thermal Engineering*, [s.l.], v. 104, p.162-175, jul. 2016. Elsevier BV.

MONTES, M.J.; C. Rubbia, R. Abbas, J.M. Martínez-Val. **A comparative analysis of configurations of linear Fresnel collectors for concentrating solar power**, *Energy* 73 (2014) 192-203.

OLIVEIRA, A. D. de. **Sistema de Rastreamento Solar Automático baseado em Algoritmo de Posição Solar Aplicado a um Refletor Fresnel Linear**. 2018. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale dos Sinos, São Leopoldo, 2018.

OSÓRIO, T.; CARVALHO, M. J. Testing of Solar Thermal Collectors under Transient Conditions. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 30, p.1344-1353, 2012. Elsevier BV.

PEREIRA, E. M. D. et al. **Mapeamento básico das condições gerais para tecnologias heliotérmicas no Brasil**. Brasília: Projeto Energia Heliotérmica, 2014. 140 p.

PLATZER, W.; DINTER, F.; CUEVAS, F.. Low cost Linear Fresnel Collector: Deliverable D.6.2. Freiburg: Scientific and Technological Alliance for Guaranteeing The European Excellence In Concentrating, 2016. 26 p.

REN21 (2018), Renewables 2016 Global Status Report, Paris, Disponível em: <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652_GSR2018_FullReport_web_final_.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2016.

SHARMA, V.; NAYAK, J. K.; KEDARE, S. B. Effects of shading and blocking in linear Fresnel reflector field. **Solar Energy**, [s.l.], v. 113, p.114-138, mar. 2015. Elsevier BV.

SILVA, António Sérgio Ribeiro da. Estimativa de Produção em Centrais Solares de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores. 2010. 88 f. Dissertação (Mestrado) , Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

SILVI, C. **The Pioneering Work on Linear Fresnel Reflector Concentrators (LFCs) in Italy**. Proceedings of the SolarPaces conference in Berlin. p.15-18, set. 2009.

SINGH, P. L.; SARVIYA, R.M.; BHAGORIA, J.L. Thermal performance of linear Fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers. *Applied Energy*, [s.l.], v. 87, n. 2, p.541-550, fev. 2010. Elsevier BV.

SOLARGIS. **Direct Normal Irradiation (DNI)**. Disponível em: <<http://solargis.com/>>. Acesso em: 18 ago. 2016.

SONG, J.; MA, J.; LI, F.; CHEN, Y.; DAI, Y. Experimental Study of a Linear Fresnel Collector with Triangular-Cavity Absorber. **Proceedings of the 2015 International Forum on Energy, Environment Science and Materials**, [s.l.], p.469-473, 2015. Atlantis Press.

SOUZA, L. E. V.; CAVALCANTE, A. M. G. Concentrated Solar Power deployment in emerging economies: The cases of China and Brazil. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], p.1-10, nov. 2016.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica** / Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord.). - EPE: Rio de Janeiro, 2016.

VIGNAROUBAN, K. et al. Heat transfer fluids for concentrating solar power systems - A review. *Applied Energy*, [s.l.], v. 146, p.383-396, maio 2015. Elsevier BV.

WALKER, G. S. **Development of a Low Cost Linear Fresnel Solar Concentrator**. 2013. 136 f. Science In Engineering (Mechanical), Faculty of Engineering, Stellenbosch University, Stellenbosch, 2013.

WEINSTEIN, L. A.; LOOMIS, J.; BHATIA, B.;BIERMAN, D. M.;WANG, E. N.; CHEN, G. Concentrating Solar Power. **Chemical Reviews** [s.l.], v. 115, n. 23, p.12797-12838, 9 dez. 2015. American Chemical Society (ACS).

ZHU, G.; WENDELIN, T.; WAGNER, M. J.; KUTSCHER, C. History, current state and future of linear Fresnel concentrating solar collectors. **Solar Energy**, [s.l.], v. 103, p.639-652, maio 2014. Elsevier BV.

YANGA, F.; ITSKHOKINEA, D.; BENMARRAZEA, S.; BENMARRAZEA, M.; HOFERB, A.; LECATC, F.; FERRIÈREC, A. Testing Procedure for Linear Fresnel Reflector Solar Systems in Utility-Scale Solar Thermal Power Plants. **Energy Procedia**. v. 69, p.1479-1487, maio 2015. Elsevier BV.