

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

LUIS CARLOS WEBLER

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DOS PARAMETROS GEOMÉTRICOS NO
DESEMPENHO DE UM REFLETOR FRESNEL LINEAR**

São Leopoldo, janeiro de 2019

Luis Carlos Webler

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS NO DESEMPENHO
DE UM REFLETOR FRESNEL LINEAR

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

Orientador: Prof. Dr. Mário Henrique Macagnan

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luis Ignacio Silva (UNRaf)

Prof. Dr. João Batista Dias (PPG Engenharia Mecânica, Unisinos)

Prof. Dra. Jacqueline Biancon Copetti (PPG Engenharia Mecânica, Unisinos)

São Leopoldo, janeiro de 2019

W376a Webler, Luis Carlos.
Análise da variação dos parâmetros geométricos no desempenho de um refletor Fresnel linear / Luis Carlos Webler. – 2019.
90 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestre) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.
“Orientador: Prof. Dr. Mário Henrique Macagnan.”

1. Energia solar. 2. Concentradores térmicos. 3. Refletor Fresnel linear. Título.

CDU 621

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo analisar o impacto dos parâmetros construtivos dos refletores Fresnel lineares (LFR) em sua eficiência geométrica e definir a largura do absorvedor de acordo com a dispersão da radiação refletida pelo campo de espelhos no plano de entrada do absorvedor. Os parâmetros analisados foram altura do absorvedor, a largura dos espelhos, o espaçamento entre espelhos, o raio de curvatura para o caso de espelhos curvados em formato cilíndrico e a distância focal para o caso de espelhos curvados em formato parabólico. A eficiência geométrica foi avaliada levando em consideração a energia na forma de radiação solar incidente sobre o LFR durante um dia e qual foi a parcela desta energia que efetivamente atingiu o absorvedor. Nesta análise também foram avaliadas as perdas presentes no processo, como sombreamento dos espelhos pelo absorvedor, perda de radiação entre espelhos, bloqueio entre espelhos, efeito cosseno e perdas por sombreamento entre espelhos. A metodologia utilizada para as análises foi o traçado de raios, executado com um código desenvolvido em MATLAB. Foi possível concluir que a utilização de espelhos curvados, com pequenos ângulos de borda, proporciona maior eficiência ao LFR do que com espelhos planos. O formato da curvatura, seja parabólico ou cilíndrico, não afetou na eficiência do LFR. O espaçamento entre espelhos deve ser o mínimo que permita o movimento dos espelhos sem risco de interferências. O aumento na altura do absorvedor também causou uma melhora na eficiência do LFR. Os parâmetros que minimizam a largura do absorvedor, que se mostrou muito importante para reduzir as perdas por sombreamento do absorvedor sobre o campo de espelhos, foram determinados. Outras perdas também foram determinadas para cada conjunto de parâmetros analisados. Os resultados obtidos podem fornecer informações para novos projetos.

Palavras-chave: Energia solar. Concentradores térmicos. Refletor Fresnel linear.

ABSTRACT

The objective of this work was to analyze the impact of the linear Fresnel reflector (LFR) parameters on its geometric efficiency and to define the width of the absorber according to the dispersion of the radiation reflected by the field of mirrors in the absorber input plane. The parameters analyzed were absorber height, mirror width, mirror spacing, radius of curvature for cylindrical curved mirrors and focal length for parabolic curved mirrors. The geometric efficiency was evaluated considering the energy in the form of solar radiation incident on the LFR during a day and the energy that effectively reached the absorber. In this analysis we also evaluated the losses present in the process, such as shading of the mirrors by the absorber, loss of radiation between mirrors, blocking between mirrors, cosine effect and losses by shading between mirrors. The methodology used for the analysis was the ray tracing, executed with a code developed in MATLAB. It was possible to conclude that the use of curved mirrors, with small rim angles, enables greater efficiency than with flat mirrors. The shape of the curvature, whether parabolic or cylindrical, did not affect the efficiency of the LFR. Spacing between mirrors must be the minimum that allows the movement of mirrors without the risk of interference. The increased height of the absorber also caused an improvement in the efficiency of the LFR. The parameters that minimize the width of the absorber, which was very important to minimize the losses by shading of the absorber on the field of mirrors, were determined. Other losses were also determined for each set of analyzed parameters. The results obtained can provide information for new projects.

Key-words: Solar Energy. Thermal Concentrators. Linear Fresnel reflector.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Irradiância espectral do Sol.....	18
Figura 2.2 - Relações geométricas entre Sol e Terra.....	19
Figura 2.3 - Definição da posição angular da esfera solar (σ).....	20
Figura 2.4 - Ângulo de zênite (θ_z), azimute (γ) e elevação solar (α).....	22
Figura 2.5 - Distribuição da emissão de radiação solar em função da posição angular no Sol para alguns valores de CSR com escala logarítmica (esquerda) e escala normal (direita).	27
Figura 2.6 - Concentrador do tipo calha parabólica (CPC).....	29
Figura 2.7 - Torre solar.....	30
Figura 2.8 - Prato parabólico.....	30
Figura 2.9 - Ângulo de incidência e de reflexão de um raio de luz.....	31
Figura 2.10 - Interface do programa SolTrace.....	33
Figura 3.1 - Lente Fresnel (b) aproximando as características ópticas de uma lente convexa (a) e um espelho Fresnel (d) aproximando as características ópticas de um espelho parabólico (c).	34
Figura 3.2 - Exemplo de um refletor Fresnel linear.....	35
Figura 3.3 - Exemplos de concentrador secundário de simples tubo (esquerda) e múltiplos tubos (direita).....	35
Figura 3.4 - Protótipo um refletor Fresnel linear, construído por Francia, em 1964.....	36
Figura 3.5 - Sistema de coordenadas para concentrador Fresnel linear.....	39
Figura 3.6 - Ângulos de elevação solar longitudinal e transversal.....	40
Figura 3.7 - Dimensões do refletor Fresnel linear.....	41
Figura 3.8 - Definição dos ângulos do refletor Fresnel linear.....	41
Figura 3.9 - Perdas por sombreamento entre espelhos adjacentes.....	43
Figura 3.10 - Perdas por bloqueio entre espelhos adjacentes.....	44
Figura 3.11 - Representação das perdas de final de linha.....	44
Figura 3.12 - Representação da perda por sombreamento do absorvedor.....	45
Figura 3.13 - Perdas pelo efeito cosseno.....	46
Figura 3.14 - Perdas entre espelhos.....	46
Figura 3.15 - Espelho parabólico.....	47
Figura 3.16 - Concentração dos raios solares refletidos no foco de um espelho parabólico....	48
Figura 3.17 - Efeito do astigmatismo em espelhos parabólicos.....	48
Figura 3.18 - Representação geométrica de um espelho cilíndrico.....	49

Figura 3.19 - Efeito da abertura do espelho cilíndrico na variação do ponto focal.....	50
Figura 3.20 - Efeito do astigmatismo em espelhos cilíndricos.....	50
Figura 3.21 - Refletor Fresnel linear contínuo.	51
Figura 4.1 - Fluxograma do código desenvolvido no MATLAB para traçado de raios.....	52
Figura 4.2 - Simulação com geração de 23 raios solares e representação da <i>apert_{proj}</i>	54
Figura 4.3 - Simulação com 23 pontos de geração de raios solares e 3 raios solares por ponto.	55
Figura 4.4 - Simulação com 150 pontos de geração de raios solares e 21 raios por ponto.	56
Figura 4.5 - Simulação com destaque para a região de entrada do absorvedor.....	56
Figura 4.6 - Distribuição da irradiância no plano de entrada do absorvedor.....	57
Figura 4.7 - Potência solar disponível e potência refletida ao absorvedor.....	58
Figura 4.8 - Perfil de radiação solar no SolTrace (esquerda) e MATLAB (direita) para um CSR de 10%.	59
Figura 4.9 - Traçado de raios pelo Software SolTrace (esquerda) e código desenvolvido em MARLAB (direita).	59
Figura 4.10 - Potência incidente no plano de entrada do absorvedor em função da elevação solar transversal.	60
Figura 4.11 - Potência incidente no plano de entrada do absorvedor em função da elevação solar longitudinal.	60
Figura 4.12 - Sensibilidade do número de raios utilizados nos resultados das simulações.....	61
Figura 5.1 - Potência incidente no plano de abertura do LFR para os solstícios e equinócios, conforme o modelo de céu claro de ESRA.....	63
Figura 5.2 - Variação da eficiência do LFR em função do espaçamento entre espelhos.	64
Figura 5.3 - Perdas do LFR em função da variação do espaçamento entre espelhos.....	65
Figura 5.4 - Energia diária refletida no plano de entrada do absorvedor.	66
Figura 5.5 - Dispersão da energia no plano de entrada do absorvedor.....	67
Figura 5.6 - Larguras do absorvedor para altura de 2000 mm.	68
Figura 5.7 - Larguras do absorvedor para altura de 3000 mm.	68
Figura 5.8 - Larguras do absorvedor para altura de 4000 mm.	69
Figura 5.9 - Larguras do absorvedor para altura de 5000 mm.	69
Figura 5.10 - Larguras do absorvedor para altura de 6000 mm.	69
Figura 5.11 - Larguras do absorvedor para altura de 7000 mm.	70
Figura 5.12 - Larguras do absorvedor para altura de 8000 mm.	70

Figura 5.13 - Largura mínima do absorvedor para o LFR com espelhos cilíndricos, em função da altura do absorvedor.....	71
Figura 5.14 - Raio de curvatura dos espelhos cilíndricos que minimizam a largura do absorvedor para diferentes alturas de absorvedor e quantidade de espelhos.....	72
Figura 5.15 - Largura de absorvedor para espelhos planos e várias alturas de absorvedor.....	73
Figura 5.16 - Compara resultados do código em MATLAB com equação proposta por CHAVES (2016).	74
Figura 5.17 - Larguras de absorvedor mínimas para LFR com espelhos parabólicos.....	75
Figura 5.18 - Avaliação dos parâmetros do LFR e distância focal dos espelhos parabólicos que minimizam a largura do absorvedor.	76
Figura 5.19 - Comparação do perfil parabólico e cilíndrico na região de maior ângulo de borda.	77
Figura 5.20 - Diferença entre curvatura de espelhos cilíndricos e parabólicos.....	77
Figura 5.21 - Eficiência geométrica para LFR com espelhos cilíndricos ou parabólicos.	78
Figura 5.22 - Perdas por sombreamento do absorvedor em LFR com espelhos cilíndricos ou parabólicos.....	79
Figura 5.23 - Perdas entre espelhos para LFR com espelhos cilíndricos ou parabólicos.....	79
Figura 5.24 - Perdas por bloqueio em LFR com espelhos cilíndricos ou parabólicos.	80
Figura 5.25 - Perdas por sombreamento dos espelhos em um LFR com espelhos cilíndricos ou parabólicos.....	81
Figura 5.26 - Perdas por efeito cosseno em um LFR com espelhos cilíndricos ou parabólicos.	81
Figura 5.27 - Eficiência geométrica para LFR com espelhos planos em função da altura do absorvedor e da quantidade e largura dos espelhos.	82
Figura 5.28 - Perdas por sombreamento do absorvedor em LFR com espelhos planos.....	83
Figura 5.29 - Perdas entre espelhos para LFR com espelhos planos.....	83
Figura 5.30 - Perdas por bloqueio entre espelhos em um LFR com espelhos planos.	84
Figura 5.31 - Perdas por sombreamento dos espelhos em um LFR com espelhos planos.	84
Figura 5.32 - Perdas por efeito cosseno em um LFR com espelhos planos.	85
Figura 5.33 - Comparação entre espelhos cilíndricos ou parabólicos e planos.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Fatores de Turbidez de Linke para Porto Alegre, RS.....	25
Tabela 2.2 - Ocorrência de CSR classificada em <i>Bins</i>	27
Tabela 4.1 - Comparação entre MATLAB e SolTrace.....	62
Tabela 5.1 - Dados de entrada para análise da variação do espaçamento entre espelhos.	64
Tabela 5.2 - Percentual da energia interceptada pelo absorvedor em função de sua largura. ..	66
Tabela 5.3 - Raios de curvatura dos espelhos para minimizar a largura do absorvedor.	71
Tabela 5.4 - Largura de absorvedor mínimas para LFR com espelhos planos.....	73

LISTA DE SIGLAS

DLR	<i>Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt</i> (Centro Aeroespacial Alemão)
DOE	<i>Department of Energy</i> (Departamento Americano de Energia)
LFR	Refletor Fresnel Linear
LBL	<i>Lawrence Berkeley National Laboratory</i> (Laboratório Nacional Lawrence Berkeley)
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i> (Laboratório Nacional de Energia Renovável dos Estados Unidos)
PTC	Concentrador de Calha Parabólica
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SIMBOLOS

$apert$	Abertura dos espelhos [m]
$apert_{proj}$	Abertura dos espelhos projetada [m]
B	Ângulo do dia [°]
ce	Comprimento do espelho [m]
CSR	Taxa de radiação circunsolar
df	Distância focal [m]
DNI	Irradiância Direta Normal [W/m ²]
$dens_{pgrs}$	Densidade de pontos de geração de raios solares
d_{TS}	Distância média Terra-Sol [m]
e	Espaçamento entre espelhos [m]
E_t	Equação do tempo
G_b	Irradiância solar direta [W/m ²]
G_{sc}	Constante solar fora da atmosfera terrestre [W/m ²]
G_{on}	Irradiância solar extraterrestre variável num plano normal à radiação [W/m ²]
h_c	Altura do absorvedor em relação ao campo de espelhos [m]
Le	Largura dos espelhos [m]
La	Largura do absorvedor [m]
LEC	Custo de eletricidade nivelado [R\$/kWh]
L_{loc}	Longitude local [°]
L_{st}	Longitude padrão [°]
m_r	Massa de ar
n	Número do ano no calendário Juliano
\vec{n}	Vetor normal
n_{rs}	Quantidade de raios solares gerados
n_{rpp}	Quantidade de raios por ponto
Pot_{pp}	Potência por ponto
Pot_{pr}	Potência por raio
Q_i	Distância horizontal do centro do espelho até a posição central do refletor [m]
Re	Raio do espelho cilíndrico [m]
TL	Coefficiente de turbidez de Linke

TO	Tempo oficial [h]
TSV	Tempo solar verdadeiro [h]
Z	Altitude local [m]

Símbolos Gregos

α	Elevação solar [°]
α_L	Elevação solar longitudinal [°]
α_s^{true}	Desvio da elevação solar pela refração da luz na atmosfera terrestre [°]
α_T	Elevação solar transversal [°]
β_i	Ângulo formado entre o plano do campo de espelhos e a linha reta do centro do espelho até o absorvedor [°]
γ	Ângulo de azimute [°]
δ	Declinação solar [°]
δ_r	Profundidade ótica de Kasten-Rayleigh
θ_Z	Ângulo de zênite [°]
ζ	Ângulo solar [°]
σ	Posição angular da esfera solar [°]
ϕ	Latitude [°]
Φ_{cs}	Radiação circunsolar
Φ_t	Radiação incidente total
ϕ_i	Inclinação dos espelhos [°]
ϕ_S	Diâmetro do Sol [m]
ϕ_T	Diâmetro da Terra [m]
ψ_{rim}	Ângulo de borda do espelho [°]
ψ_{rimf}	Ângulo de borda do refletor Fresnel linear [°]
χ	Taxa de radiação circunsolar
ω	Ângulo horário [°]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 Objetivo Geral	14
1.1.2 Objetivos Específicos.....	14
1.2 JUSTIFICATIVA	15
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 O SOL.....	17
2.2 O ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR	18
2.3 A RADIAÇÃO SOLAR DIRETA	18
2.4 A POSIÇÃO DO SOL.....	19
2.5 O ANGULO DA ESFERA SOLAR.....	19
2.6 TEMPO SOLAR VERDADEIRO	20
2.7 DIREÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR DIRETA.....	21
2.8 MASSA DE AR RELATIVA	23
2.9 MODELO DE RADIAÇÃO.....	24
2.100 COEFICIENTE DE TURBIDEZ DE LINKE	25
2.11A DISTRIBUIÇÃO RADIAL DA RADIAÇÃO SOLAR.....	25
2.12COLETORES DE ENERGIA SOLAR	28
2.13TECNOLOGIAS DE CONCENTRAÇÃO SOLAR.....	28
2.14ÓPTICA DOS REFLETORES.....	31
2.15METODOLOGIA DE TRAÇADO DE RAIOS.....	31
2.16O SOLTRACE.....	32
3 REFLETOR FRESNEL LINEAR	34
3.1 HISTÓRIA DOS SISTEMAS FRESNEL LINEARES	36
3.2 ESTUDOS RELEVANTES COM SISTEMAS FRESNEL LINEARES	36
3.3 VANTAGENS DOS REFLETORES FRESNEL LINEARES	38
3.4 GEOMETRIA DO REFLETOR FRESNEL LINEAR.....	38
3.5 EFICIÊNCIA GEOMÉTRICA.....	42
3.6 PERDAS ÓPTICAS	43
3.6.1 Perdas por bloqueio e sombreamento	43
3.6.2 Perdas de final de linha.....	44

3.6.3 Perdas por sombreamento do absorvedor	45
3.6.4 Efeito cosseno.....	45
3.6.5 Perdas entre espelhos.....	46
3.7 CURVATURA DE ESPELHOS PARABÓLICOS E CILINDRICOS.....	47
3.7.1 Espelhos parabólicos.....	47
3.7.2 Espelhos cilíndricos.....	49
3.8 LARGURA DO ABSORVEDOR.....	50
4 METODOLOGIA.....	52
4.1 O DESENVOLVIMENTO DO CODIGO EM MATLAB	52
4.2 A POTÊNCIA DOS RAIOS SOLARES.....	53
4.3 O CÁLCULO DA POTÊNCIA INCIDENTE NO PLANO DO ABSORVEDOR	56
4.4 O CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE NO PLANO DO ABSORVEDOR.....	57
4.5 VALIDAÇÃO DO CÓDIGO EM MATLAB	58
4.6 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO CÓDIGO DESENVOLVIDO EM MATLAB RELAÇÃO AO SOLTRACE.....	62
5 SIMULAÇÃO DA VARIAÇÃO DOS PARAMETROS DO LFR.....	63
5.1 AVALIAÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE ESPELHOS	64
5.2 CRITÉRIO PARA DEFINIÇÃO DA LARGURA DO ABSORVEDOR	65
5.3 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO RAIOS DE CURVATURA DOS ESPELHOS CILINDRICOS NA LARGURA DO ABSORVEDOR.....	68
5.4 AVALIAÇÃO DA LARGURA DO ABSORVEDOR PARA ESPELHOS PLANOS	73
5.5 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA DISTÂNCIA FOCAL DOS ESPELHOS PARABÓLICOS NA LARGURA DO ABSORVEDOR	75
5.6 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA GEOMÉTRICA PARA ESPELHOS CILÍNDRICOS OU PARABÓLICOS.....	78
5.7 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA GEOMÉTRICA PARA ESPELHOS PLANOS	82
5.8 COMPAÇÃO DENTRE LFR COM ESPELHOS CILINDRICOS OU PARABÓLICOS E PLANOS.....	85
6 CONCLUSÕES.....	87

1 INTRODUÇÃO

A atividade econômica industrial de um país, bem como a qualidade de vida de sua população está diretamente ligada à disponibilidade de energia. Desde o início da revolução industrial, a demanda por energia foi suprida em grande escala por combustíveis fósseis, como carvão mineral e petróleo. Porém estes combustíveis foram acumulados na Terra por mais de 5 milhões de anos e com a atual taxa de consumo, estima-se que o petróleo irá se esgotar em aproximadamente um século e o carvão mineral em menos de 500 anos (GOSWAMI, 2015). Assim se faz necessário o desenvolvimento de tecnologias para aproveitamento de outras formas de energia.

A emissão CO₂ na atmosfera terrestre causada pela queima de combustíveis fósseis é outro fator importante a considerar, pois existem suspeitas de que estas emissões causam o aquecimento global. Embora a relação das emissões de CO₂ com o aquecimento global não seja claramente quantificável, é uma associação muito provável e a extensão das consequências difíceis de prever. Aguardar até que esta relação seja totalmente esclarecida, seria negligência e/ou irresponsabilidade (MERTINS, 2009).

A mudança da matriz energética de não renovável para renovável, depende fundamentalmente de questões econômicas. Infelizmente a perspectiva da exaustão dos combustíveis fósseis e o prejuízo ao meio ambiente pela emissão de gases na atmosfera não são ainda, por si só, suficientes para o desenvolvimento de fontes de energia sustentáveis. Se não for economicamente viável, a utilização da tecnologia não será expandida em grande escala. O processo de conversão da energia solar em energia térmica para utilização em processos industriais ou mesmo em usinas termoeletricas apresenta perdas. Estas perdas, que podem ser ópticas ou térmicas, afetam diretamente a eficiência energética e conseqüentemente o custo em relação a outras fontes de energia.

Dentre as tecnologias de concentração solar disponíveis atualmente, os refletores Fresnel lineares destacam-se pelo grande potencial de redução do custo nivelado de produção de eletricidade (ABBAS; MARTÍNEZ-VAL, 2015). Como esta tecnologia não está ainda tão desenvolvida, ainda existe uma grande margem para aumento da eficiência.

Por muito tempo, as pesquisas em concentradores solares focaram nos concentradores do tipo calha parabólica (PTC), pois estes representam a solução ótima no que se refere a taxa de concentração e energia coletada por área de abertura. Isto contribuiu para que a tecnologia de PTC evoluísse, e a tecnologia de concentradores Fresnel lineares ficasse atrasada tecnologicamente. Porém quando analisados outros aspectos, os concentradores tipo Fresnel

lineares (LFR) apresentam muitas vantagens. Dentre as vantagens, pode-se citar o absorvedor fixo, utilização de espelhos planos ou levemente curvados, estrutura do sistema menos robusta (em função de menor carga mecânica em função de ventos), maior facilidade de limpeza e manutenção. Levando-se em consideração estes aspectos, os LFR se tornam uma alternativa competitiva economicamente em relação aos PTC.

Porém, estudos ainda são necessários para determinar os parâmetros ótimos de projeto dos LFR, de modo a obter uma maior eficiência. Dentre os parâmetros que ainda precisam ser melhor estudados está a utilização de espelhos planos ou levemente curvados. Conceitualmente, os espelhos em um concentrador Fresnel poderiam ser planos, já que sua função é refletir a radiação solar até o tubo absorvedor. A utilização de espelhos planos pode reduzir os custos de instalação, já que o processo de fabricação é facilitado, porém, estudos tem mostrado que a utilização de espelhos levemente curvados, tendem a apresentar uma melhor eficiência óptica do sistema, e por consequência uma melhor eficiência global do sistema. Mas ainda existem muitas dúvidas quanto aos parâmetros de projetos de concentradores que utilizam esta tecnologia.

1.1 OBJETIVOS

Nos subcapítulos subsequentes serão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos propostos nessa dissertação.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar, através do desenvolvimento de um código em MATLAB, a influência dos parâmetros geométricos do conjunto de espelhos no desempenho de um refletor Fresnel linear na concentração da irradiância solar refletida ao plano de entrada do absorvedor.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um código em MATLAB para simulação para o traçado de raios;
- Validar o código desenvolvido utilizando o programa SolTrace.
- Realizar o modelamento matemático de espelhos planos, cilíndricos e parabólicos;

- Simular a potência e energia refletida no plano de entrada do absorvedor por um LFR utilizando espelhos planos, cilíndricos e parabólicos, com diferentes raios de curvaturas e distâncias focais, respectivamente;
- Determinar as perdas por bloqueio, efeito cosseno, sombreamento dos espelhos, sombreamento do absorvedor e perdas de radiação entre os espelhos;
- Determinar a largura do absorvedor ótimas para diversas configurações geométricas do LFR, com base na energia concentrada no absorvedor ao longo de 1 dia;
- Avaliar a influência da variação do formato dos espelhos e dos parâmetros geométricos do LFR na eficiência.

1.2 JUSTIFICATIVA

Apesar de existirem programas capazes de realizar o traçado de raios, estes ainda possuem muitas limitações. Dentre as limitações, pode-se citar a necessidade de cálculo prévio (em programa externo ou manualmente) dos ângulos de inclinação dos espelhos e da posição solar, bem como dos níveis de irradiância disponíveis. Quanto aos resultados fornecidos, normalmente são de potência média no plano de entrada do absorvedor ou perfil de potência, para apenas um determinado conjunto de dados de entrada. Para outra simulação, os dados de entrada precisam ser corrigidos e executados em nova simulação. Assim, para obter a energia concentrada no decorrer de um período, várias simulações precisam ser realizadas para obter a potência instantânea e, então realizar a integração em software externo. Isso torna o processo pouco produtivo, fazendo com que as análises sejam realizadas levando em consideração a potência em apenas um determinado horário do dia (normalmente o meio-dia) ou ainda a energia, a partir da simulação da potência horária e interpolar e integrar. Assim, o desenvolvimento de um código para traçado de raios em MATLAB pode apresentar muitas vantagens. Primeiramente, o desenvolvimento do código proporciona um conhecimento de como funciona o traçado de raios, e assim, melhor avaliar os resultados obtidos. Adicionalmente, é possível criar no código, sub-rotinas para cálculo da geometria dos espelhos e ângulos de inclinação, ângulos solares e níveis de irradiância. Outra vantagem é integrar a potência refletida ao plano de entrada do absorvedor, obtendo a energia concentrada durante um período pré-determinado. Porém, para garantir a confiabilidade dos resultados fornecidos, a validação do código desenvolvido se faz necessária.

A partir das simulações, será possível avaliar a influência do formato dos espelhos na eficiência do LFR. Esta informação é de grande importância, pois devido a complexidades diferentes no processo de fabricação de cada formato de espelho, o custo de fabricação também será diferente. Assim, poderá auxiliar na tomada de decisão em novos projetos.

O aumento da eficiência do LFR depende da minimização das perdas. Para isso, a quantificação de cada tipo de perda e suas relações com os parâmetros geométricos podem auxiliar no projeto de LFR.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

No capítulo 2 são apresentadas as características do Sol e da radiação solar, a modelagem matemática para definir a posição do Sol, uma breve revisão de óptica aplicada a refletores e as principais tecnologias de concentração da radiação solar existentes.

O capítulo 3 apresenta com mais detalhes o refletor Fresnel linear, abordando sua história, estudos relevantes, vantagens, geometria, perdas ópticas e modelagem matemática dos espelhos cilíndricos e parabólicos.

O capítulo 4 descreve a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho.

O capítulo 5 apresenta os resultados que foram obtidos com a modelagem do refletor Fresnel linear com o uso do código para traçado de raios, desenvolvida em MATLAB.

O capítulo 6 apresenta os resultados obtidos e recomendações para futuros trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nos subcapítulos subsequentes, serão apresentados os conceitos que servirão de base para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 O SOL

Localizado no centro de nosso sistema solar, o Sol é a estrela mais próxima da Terra. A energia proveniente do Sol na forma de radiação solar suporta quase que toda a vida na Terra via fotossíntese. Também é esta energia que controla o clima e a temperatura da Terra. Pode-se afirmar que quase todas as formas de energia no mundo têm origem na energia solar. Petróleo, carvão mineral, gás natural e madeira foram originalmente produzidos por processos fotossintéticos, seguidos por reações químicas complexas nas quais a vegetação foi sujeita a altas temperaturas e pressões por um longo período. Até mesmo o vento e as marés tem origem solar, pois são causados por diferenças de temperatura em várias regiões da Terra (KALOGIROU, 2009).

Possuindo uma temperatura de corpo negro efetiva de 5.777 K, o Sol é considerado um reator nuclear contínuo. Várias reações de fusão nuclear foram sugeridas para explicar a radiação emitida pelo Sol, sendo que a considerada mais importante é o processo que combina dois átomos de hidrogênio para formar um átomo de hélio, com liberação de energia em função da redução de massa (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

A energia produzida pelo Sol é liberada a uma taxa da ordem de $3,8 \times 10^{20}$ MW, e uma parcela, cerca de $1,7 \times 10^{11}$ MW atinge a Terra. Apesar de ser uma parcela pequena em relação ao total de energia liberada pelo Sol, estima-se que aproximadamente 84 minutos de radiação solar atingindo a Terra, seja equivalente a demanda mundial de energia em um ano, aproximadamente 900 EJ (KALOGIROU, 2009).

Conforme IQBAL (1983), a quantidade de energia solar, em todos os comprimentos de onda, recebida em uma unidade de área, perpendicular à direção de propagação da radiação, fora da atmosfera terrestre é chamada de constante solar (G_{sc}). Seu valor foi exaustivamente estudado e hoje o valor adotado é de 1367 W/m^2 com um desvio padrão de $1,6 \text{ W/m}^2$ e um desvio máximo de 7 W/m^2 e a incerteza da ordem de 1% (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

2.2 O ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR

A radiação eletromagnética proveniente do Sol é composta de vários comprimentos de onda, formando uma distribuição espectral. Na Figura 2.1 pode ser observada uma representação desta distribuição espectral.

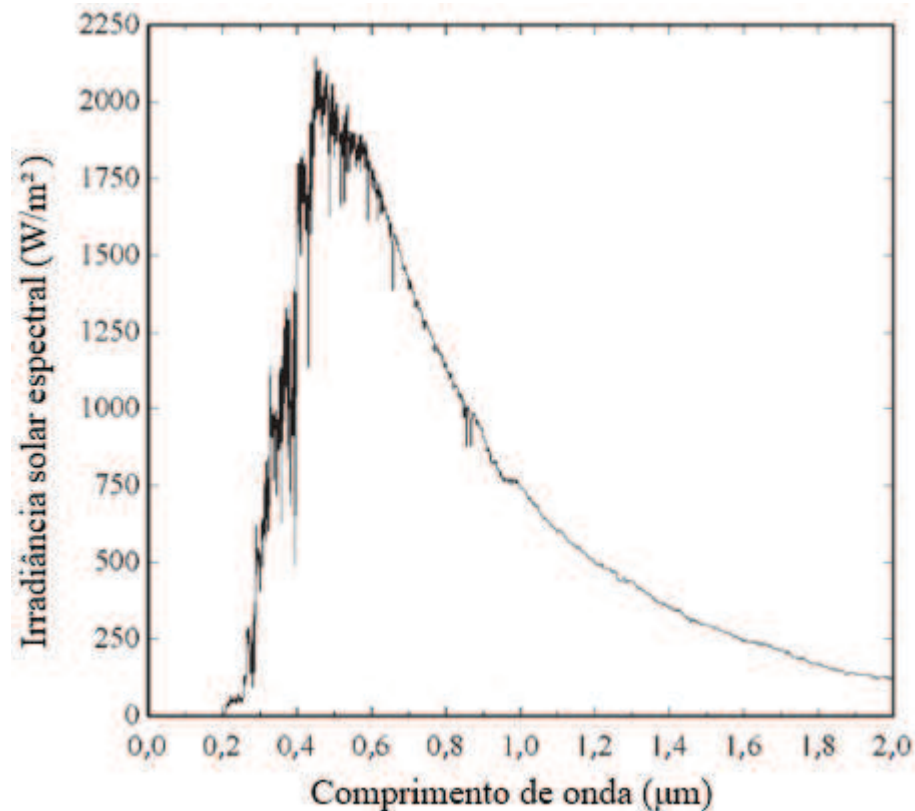


Figura 2.1 - Irradiância espectral do Sol.

Fonte: adaptado de DUFFIE e BECKMAN (2013).

2.3 A RADIAÇÃO SOLAR DIRETA

A radiação eletromagnética proveniente do Sol, antes de chegar a superfície da Terra, atravessa a sua atmosfera. Na atmosfera, a radiação entra em contato com a matéria que a compõe, que não só absorve parte desta radiação, mas também provoca uma mudança de direção (dispersão). A porção da radiação que sofreu mudança de direção pode ainda, dependendo do ângulo de dispersão, ser devolvida para o espaço ou ainda atingir a superfície da Terra com um ângulo diferente. A parte que não sofreu dispersão é chamada radiação direta. A taxa na qual a energia radiante direta normal atinge uma superfície, por unidade de

área, é chamada de Irradiância Direta Normal (DNI). A DNI é a base para todos os sistemas de utilização da energia solar por meio de concentradores. O valor da DNI normalmente é medido por meio de dispositivos específicos para este fim, como os pirheliômetros, para ser utilizado em simulações e estimativas do potencial de aproveitamento da energia solar em projetos de utilização da energia solar.

2.4 A POSIÇÃO DO SOL

A Terra realiza uma rotação completa sobre seu eixo em aproximadamente 24 horas e uma translação em torno do Sol em aproximadamente 365,25 dias. O caminho descrito pelo movimento de translação forma uma elipse com o Sol em um de seus focos.

2.5 O ANGULO DA ESFERA SOLAR

Para muitas aplicações, principalmente àquelas em que se utilizam dispositivos ópticos como espelhos e lentes, o Sol não pode ser considerado como uma fonte de energia pontual. Em função da distância entre a Terra e o Sol e de seus diâmetros, é possível determinar o ângulo da esfera solar em relação a superfície na Terra. De acordo com DUFFIE e BECKMAN (2013) a distância média entre a Terra e o Sol é de $1,495 \times 10^{11}$ m, mas devido a excentricidade da órbita da Terra em torno do Sol, este valor varia 1,7% ao longo do ano. Na Figura 2.2 pode-se ver uma representação dos diâmetros do Sol e da Terra e sua distância média.

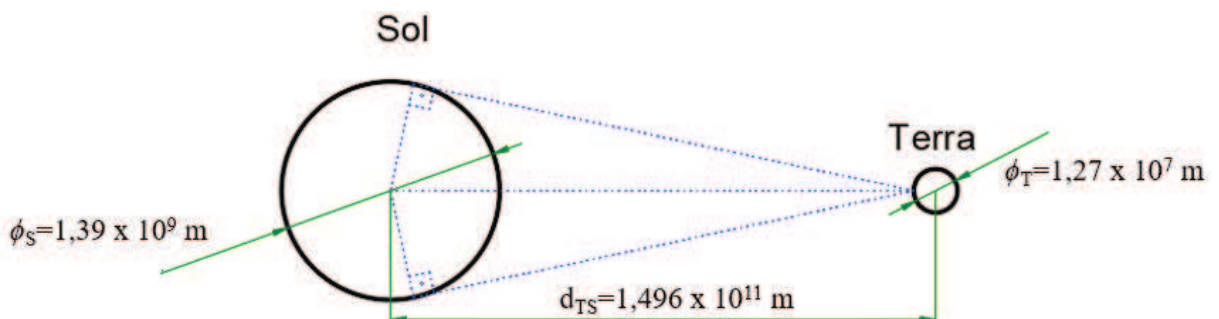


Figura 2.2 - Relações geométricas entre Sol e Terra.

Nessa figura, ϕ_s representa o diâmetro do Sol, ϕ_T representa o diâmetro da Terra e d_{TS} representa a distância média Terra-Sol. Aplicando as dimensões da Figura 2.2 na Equação

(2.1), é possível obter o ângulo subtendido do Sol (ξ), visto por um observador na Terra, cujo valor é de $0,5304^\circ$ ou $9,291$ mrad.

$$\xi = 2 \arctan \left\{ \frac{\phi_s}{2d_{TS}} \right\} \quad (2.1)$$

Em função do ângulo da esfera solar, a radiação solar incidente na Terra não é paralela, mas tem uma ligeira divergência. A intensidade da radiação varia em função da posição angular na esfera solar (σ), sendo que a radiação é máxima no centro da esfera solar e vai reduzindo de intensidade em direção às bordas. A posição angular na esfera solar (σ) pode ser visualizada na Figura 2.3.

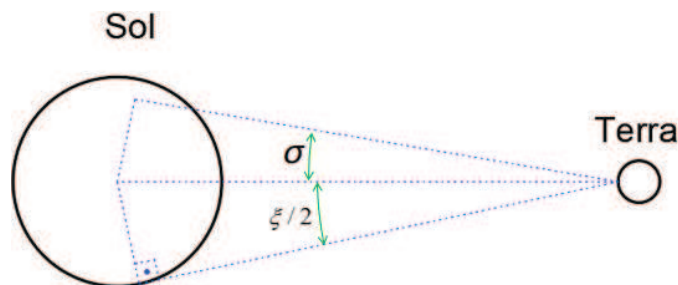


Figura 2.3 - Definição da posição angular da esfera solar (σ).

2.6 TEMPO SOLAR VERDADEIRO

Em cálculos envolvendo a posição aparente do Sol, o tempo solar verdadeiro (*TSV*) deve ser utilizado. O *TSV* é baseado no movimento aparente angular do Sol, visto de um observador na superfície da Terra. O tempo em que o Sol cruza o meridiano do observador é o meio-dia do *TSV*. Isto usualmente não coincide com o horário das 12 h do tempo oficial (*TO*). Pode-se calcular o *TSV* utilizando a Equação (2.2).

$$TSV = TO \pm 4(L_{st} - L_{loc}) + E_t \quad (2.2)$$

onde L_{st} é a longitude padrão (base do *TO*), L_{loc} é a longitude local e E_t é a equação do tempo. A correção de longitude é positiva se a longitude local está à leste da longitude padrão e negativa se está à oeste.

A equação do tempo (E_t) é a correção necessária devido à excentricidade da órbita da Terra e a inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano de translação. A equação do tempo é dada pela Equação (2.3):

$$E_t = 229,2(0,000075 + 0,001868\cos B - 0,032077\sin B - 0,014615\cos(2B) - 0,04089\sin(2B)) \quad (2.3)$$

onde B é dado pela Equação (2.4):

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (2.4)$$

e n é o dia do ano no calendário Juliano (variando de 1 a 365).

2.7 DIREÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR DIRETA

Para praticamente todas as aplicações para utilização da energia solar, é importante conhecer a posição do Sol. Os ângulos para definir a posição do Sol em relação a uma superfície situada na Terra são:

- θ_z – Ângulo de zênite: o ângulo formado entre a normal de uma superfície horizontal e o vetor Terra-Sol.
- γ – Ângulo de azimute: o deslocamento angular da projeção do vetor Terra-Sol no plano horizontal em relação ao sul.
- α – Ângulo de elevação solar: o ângulo formado entre a horizontal e o vetor Terra-Sol.

Estes ângulos estão representados na Figura 2.4 para melhor entendimento.

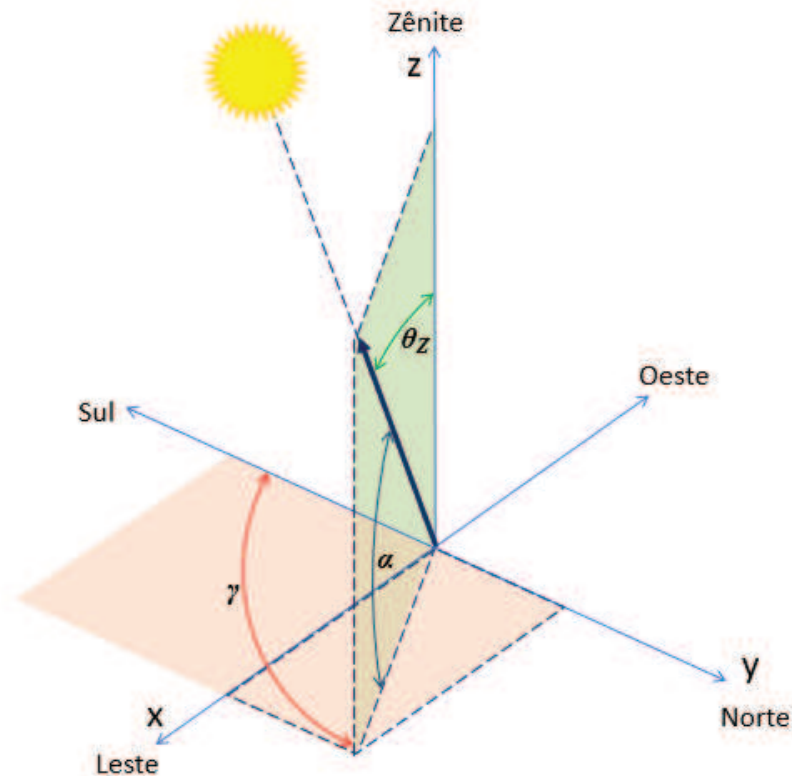


Figura 2.4 - Ângulo de zênite (θ_z), azimute (γ) e elevação solar (α).

Também na Figura 2.4 é possível observar que a soma do ângulo de zênite (θ_z) e o ângulo de elevação solar (α) é 90° .

Outras variáveis necessárias são:

- ϕ – Latitude: a posição angular norte ou sul em relação à linha do equador, variando de $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$, sendo ao norte positivo.
- ω – Ângulo horário: é o deslocamento angular do Sol para leste ou oeste do meridiano local devido à rotação da Terra em um ângulo de 15° por hora, sendo que pela manhã este valor é negativo e a tarde é positivo.
- δ – Declinação solar: é o ângulo formado entre o plano equatorial da Terra e uma linha que une os centros da Terra e de Sol.

O ângulo horário (ω) pode ser calculado utilizando a Equação (2.5).

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (2.5)$$

Já a declinação solar (δ) pode ser calculada utilizando a Equação (2.6).

$$\begin{aligned} \delta = & (180/\pi)(0,006918-0,399912\cos(B)+0,070257\sin(B) \\ & -0,006758\cos(2B)+0,000907\sin(2B) \\ & -0,002697\cos(3B)+0,00148\sin(3B)) \end{aligned} \quad (2.6)$$

onde B já foi descrito na Equação (2.4).

Entre os ângulos mencionados, podem ser atribuídas várias relações:

$$\theta_z = \cos^{-1}(\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen} \phi \text{sen} \delta) \quad (2.7)$$

$$\gamma = \frac{|\omega|}{\omega} \cdot \left| \arccos \left(\frac{\cos \theta_z \text{sen} \phi - \text{sen} \delta}{\text{sen} \theta_z \cos \phi} \right) \right| \quad (2.8)$$

2.8 MASSA DE AR RELATIVA

Um dos fatores responsáveis pela atenuação da radiação solar é sua passagem pela atmosfera terrestre. O valor desta atenuação irá depender do caminho percorrido pela radiação para atravessar a atmosfera. Este caminho percorrido pela radiação é definido como massa de ar. Quando o Sol está posicionado no zênite de um ponto arbitrário na superfície terrestre, a massa de ar é mínima. À medida que o ângulo de zênite aumenta, a radiação precisa percorrer um caminho maior dentro da atmosfera, ou atravessar uma massa de ar maior, para atingir a superfície, resultando também em uma atenuação maior. Para fins práticos, o que é utilizado normalmente é a massa de ar relativa, que representa a massa de ar que a radiação precisa atravessar estando o Sol no zênite local, em relação à massa de ar que a radiação precisa atravessar estando o Sol em qualquer posição aparente em relação à superfície na Terra. Para determinar seu valor, KASTEN e YOUNG (1989) apresentaram a Equação (2.9) que tem uma exatidão superior a 0,1% para ângulos de zênite menores que 86° e um erro máximo para para $\theta_z = 89,5^\circ$.

$$m_r = \frac{1 - \frac{Z}{10^4}}{\text{sen} \alpha_s^{true} + 0,50572(57,2957 \alpha_s^{true} + 6,07995)^{-1,6364}} \quad (2.9)$$

onde Z é a altitude local e α_s^{true} representa o desvio da elevação solar pela refração da luz na atmosfera terrestre, conforme equação (2.10).

$$\alpha^{true} = \alpha + \Delta a_{ref} \quad (2.10)$$

onde Δa_{ref} é calculado pela Equação (2.11).

$$\Delta a_{ref} = 0,061359 \frac{0,1594 + 1,1203\alpha + 0,06565\alpha^2}{1 + 28,9344\alpha + 277,3971\alpha^2} \quad (2.11)$$

2.9 MODELO DE RADIAÇÃO

Informações detalhadas sobre os níveis de radiação solar disponíveis em um determinado local são essenciais para o projeto de sistemas de aproveitamento da energia solar e a estimativa de energia térmica convertida. De acordo com GOSWAMI (2015), os dados mais indicados para a radiação solar são a média de radiação medida ao longo de muitos anos (30 anos ou mais), porém estas informações não estão disponíveis para todos os locais. Quando dados de medição não estão disponíveis, faz-se necessário a utilização de um modelo de radiação (modelo teórico) baseado em algum parâmetro climático. Vários modelos de radiação foram propostos, sendo o modelo de ESRA (*European Solar Radiation Atlas*) (RIGOLLIER; BAUER; WALD, 2000) um dos mais aceitos atualmente. Este modelo apresentou uma grande acuracidade, quando comparado os valores previstos com medições realizadas no nível do solo. Neste modelo, o coeficiente de Turbidez de Linke é o principal parâmetro, além da altitude local e elevação solar.

De acordo com o modelo ESRA, a componente direta da radiação é obtida pela Equação (2.12).

$$G_b = G_{on} \text{sen}\alpha e^{-8,8662TLm_r\delta_r} \quad (2.12)$$

onde G_b é a irradiação solar direta, TL é o coeficiente de turbidez de Linke, m_r é a massa de ar, calculada pela Equação (2.9) e δ_r é a profundidade óptica de Kasten-Rayleigh, calculada pela Equação (2.13).

$$\delta_r = (6,62960 + 1,75130m_r - 0,12020m_r^2 - 0,00013m_r^4)^{-1} \quad (2.13)$$

2.10 O COEFICIENTE DE TURBIDEZ DE LINKE

O coeficiente de turbidez de Linke indica o nível de turbidez da atmosfera local e a atenuação e dispersão que a turbidez causa na radiação solar. Este parâmetro está relacionado ao nível de dispersão da radiação solar em função de aerossóis e a absorção da radiação por gases, principalmente vapor de água, presentes na atmosfera.

O coeficiente de turbidez de Linke para a região de Porto Alegre foi estudado por RÔSSA (2014), chegando a um valor médio anual de 4,03 e um valor mensal conforme apresentado na Tabela 2.1 e que serão utilizados neste trabalho.

Tabela 2.1 - Fatores de Turbidez de Linke para Porto Alegre, RS.

Mês	Fator de Turbidez de Linke (TL)
Janeiro	4,11
Fevereiro	5,24
Março	3,41
Abril	3,99
Mai	4,20
Junho	3,76
Julho	3,48
Agosto	3,52
Setembro	4,12
Outubro	4,40
Novembro	4,50
Dezembro	3,67

Fonte: adaptado de RÔSSA (2014).

2.11 A DISTRIBUIÇÃO RADIAL DA RADIAÇÃO SOLAR

Em algumas aplicações pode ser possível considerar o Sol como uma fonte pontual de radiação. Neste caso, quando implementado em programas de traçado de raios, a radiação será

modelada pela geração de raios paralelos, com potência uniforme para todos eles. Porém em aplicações envolvendo dispositivos ópticos para concentração da energia solar, modelos mais realísticos se fazem necessário. Um modelo amplamente utilizado é o chamado *Pillbox*. Este modelo 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 não uniforme 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). A CSR (χ) relaciona a potência proveniente da região externa ao disco solar, também chamada de radiação circunsolar (Φ_{cs}), com a radiação incidente total (Φ_t), conforme Equação (2.14).

$$\chi = \frac{\Phi_{cs}}{\Phi_t} \quad (2.14)$$

Matematicamente, o modelo de Buie está representado pela Equação (2.15).

$$\phi(\sigma) = \begin{cases} \frac{\cos(0,326\sigma)}{\cos(0,308\sigma)} & 0 \leq \sigma \leq 4,65 \text{ mrad} \\ e^{\kappa\sigma^\vartheta} & \sigma > 4,65 \text{ mrad} \end{cases} \quad (2.15)$$

onde os termos ϑ e κ são obtidos pelas Equações (2.16) e (2.17), respectivamente.

$$\vartheta = 2,2 \ln(0,52\chi)\chi^{0,43} - 0,1 \quad (2.16)$$

$$\kappa = 0,9 \ln(13,5\chi)\chi^{-0,3} \quad (2.17)$$

A partir das Equações (2.15), (2.16) e (2.17), é possível obter gráficos da radiação em função do CSR e da posição angular à partir do centro da esfera solar, como pode ser observado na Figura 2.5 para alguns valores de CSR.

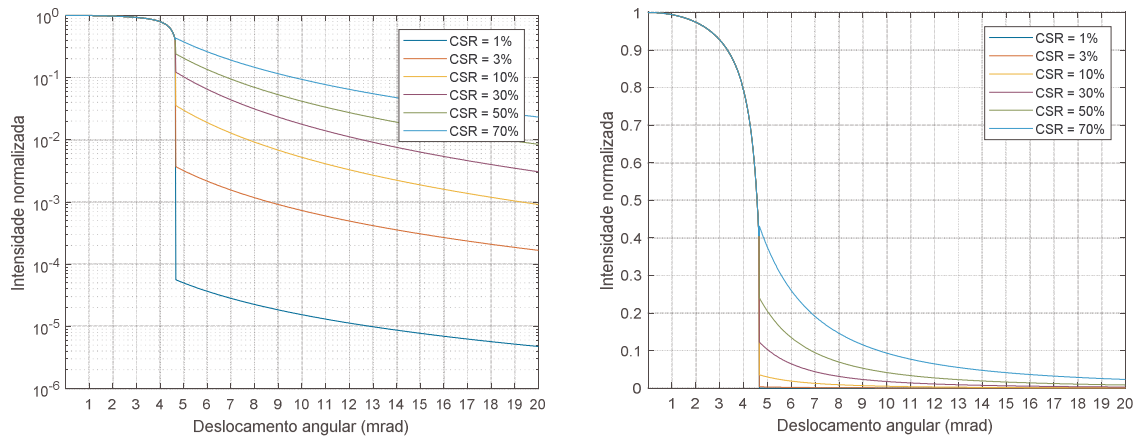


Figura 2.5 - Distribuição da emissão de radiação solar em função da posição angular no Sol para alguns valores de CSR com escala logarítmica (esquerda) e escala normal (direita).

Ainda que o modelo de Buie aproxime o perfil de radiação solar para um determinado CSR, este último ainda não está totalmente definido quanto à previsão de seu valor. O que foi possível determinar a partir das medições, é uma probabilidade de um perfil de radiação ocorrer em uma determinada faixa de nível de radiação solar, conforme pode ser observada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Ocorrência de CSR classificada em *Bins*.

CSR	Frequência de ocorrência no DNI [%]					
	DNI [W/m ²]					
	0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000	1000-1200
0-4% CSR	5,7	19,3	47,5	77,4	74,1	100,0
4-7% CSR	0,0	6,8	9,3	12,4	22,8	0,0
7-15% CSR	0,0	9,3	20,3	7,4	3,0	0,0
15-25% CSR	2,9	21,1	18,3	2,7	0,1	0,0
25-35% CSR	5,7	26,1	4,1	0,1	0,0	0,0
>35% CSR	85,7	17,4	0,6	0,0	0,0	0,0
Soma	100	100	100	100	100	100

Fonte: adaptado de MERTINS (2009).

Como não há definição do perfil de radiação solar para a região de Porto Alegre, foi utilizado neste trabalho um valor de CSR de 10%, valor este que também foi utilizado por

MERTINS (2009), justificando que normalmente baixos CSR estão associados a altos níveis de radiação.

2.12 COLETORES DE ENERGIA SOLAR

Coletores de energia solar são tipos especiais de trocadores de calor que absorvem a radiação solar e a converte em calor. Este calor é então transferido para um fluido (normalmente ar, água ou óleo) para ser utilizado diretamente, ou também pode ser direcionado a tanques de armazenamento térmico para posterior utilização, por exemplo à noite ou em dias encobertos (KALOGIROU, 2009). Quanto à concentração da energia solar, os coletores podem ser classificados em não-concentradores e concentradores.

O tipo mais simples de coletor é o não-concentrador, que possui a mesma área para interceptar e absorver a radiação solar. Neste grupo se destacam os coletores solares de placas planas, que podem ser utilizados para aquecimento de fluidos até uma temperatura próxima de 100°C acima da temperatura ambiente. Estes coletores são dispositivos de mecânica muito simples, pois não utilizam sistemas de movimentação em função da posição do Sol e requerem pouca manutenção (DUFFIE; BECKMAN, 2013). As principais aplicações dos coletores solares de placas planas são para aquecimento de água, aquecimento predial, ar condicionado e calor de processo industrial de baixas temperaturas.

Já os coletores concentradores utilizam-se de dispositivos ópticos como espelhos e lentes para interceptar a radiação solar e direcionar o fluxo de energia solar para uma área absorvedora menor, aumentando o fluxo de radiação e diminuindo as perdas por convecção e radiação. Com isto é possível atingir temperaturas muito maiores que aquelas possíveis com coletores não-concentradores.

2.13 TECNOLOGIAS DE CONCENTRAÇÃO SOLAR

De acordo com KALOGIROU (2009) existem quatro principais tecnologias de concentração solar, denominados de acordo com a geometria dos coletores (espelhos): calha parabólica (CPC), torre solar, prato parabólico e o refletor Fresnel linear (LFR). Muitos dos coletores concentradores utilizam também a movimentação de um ou dois de seus eixos seguindo o movimento aparente do Sol, de modo a maximizar a concentração da energia solar.

Nos concentradores tipo calha parabólica (CPC), a radiação solar é concentrada através de uma superfície refletora curvada em formato parabólico, até um tubo localizado no foco da parábola. O sistema se movimenta em um eixo para que os raios solares atinjam a parábola na direção paralela ao seu eixo de simetria, de modo que os raios solares sejam refletidos até o tubo central, que transporta o fluido de transferência de calor. A tecnologia CPC representa a solução ótima no que se refere à relação de concentração e ao nível de energia atingível por área, por isso que os esforços para desenvolver tecnologia de concentração tem focado muito em calhas parabólicas (GÜNTHER, 2011). Porém os CPC exigem um alto investimento para as superfícies reflexivas e também estruturas robustas para suportar a ação do vento. Um exemplo de CPC pode ser visualizado na Figura 2.6.



Figura 2.6 - Concentrador do tipo calha parabólica (CPC).

Fonte: SONNENENERGIE (2017).

A torre solar (Figura 2.7), utiliza grandes espelhos, chamados de heliostatos, para refletir a radiação solar até a torre onde se encontra o fluido a ser aquecido. Este sistema é mais complexo, pois necessita de acionamento de dois eixos para constantemente ajustar a posição do heliostato de acordo com a posição solar. São normalmente empregados para gerar vapor que será aplicado na geração de eletricidade em usinas termoeletricas.



Figura 2.7 - Torre solar.

Fonte: SONNENENERGIE (2017).

O prato parabólico, mostrado na Figura 2.8, consiste de uma estrutura reflexiva em formato de um parabolóide de revolução, para refletir a radiação em um receptor montado no ponto focal. Estes concentradores são montados em uma estrutura com dois eixos de movimentação que se ajustam de acordo com o movimento aparente do Sol. A energia coletada é tipicamente utilizada diretamente em um motor *Stirling* instalado no receptor, se movendo com toda a estrutura.



Figura 2.8 - Prato parabólico.

Fonte: SONNENENERGIE (2017).

Outro tipo de concentrador, que é o foco principal deste trabalho e que será apresentado com mais detalhes no capítulo 3 é o concentrador refletor Fresnel linear.

2.14 ÓPTICA DOS REFLETORES

De acordo com a lei da reflexão, uma superfície reflexiva irá refletir um raio de luz com o mesmo ângulo que recebeu em relação a um vetor normal à superfície (SMITH, 2000). Isto vale tanto para superfícies planas como para superfícies curvas. Na Figura 2.9 pode-se ver uma representação dos ângulos de incidência e de reflexão em uma superfície curva.

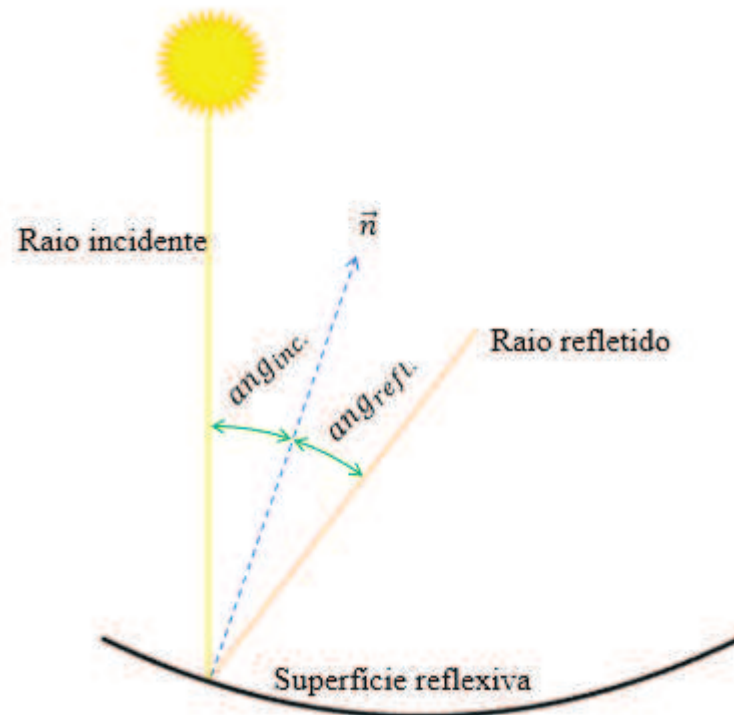


Figura 2.9 - Ângulo de incidência e de reflexão de um raio de luz.

2.15 METODOLOGIA DE TRAÇADO DE RAIOS

Para avaliar o desempenho de sistemas ópticos, uma das principais técnicas utilizadas é o traçado de raios (em inglês *Ray Tracing*). Esta técnica consiste em utilizar programas para modelar o sistema óptico, que pode ser composto de lentes, refletores e absorvedores. A partir da definição da posição solar, são traçados raios que interagem com os componentes do sistema. A quantidade de raios irá depender da precisão desejada para os resultados. A origem dos raios sobre o sistema óptico pode seguir uma distribuição uniforme (mesma distância entre cada raio adjacente) e paralelos com um vetor direção Sol-Terra. Também podem ser traçados raios com diferentes ângulos de inclinação, para simular a radiação oriunda de diferentes posições no disco solar.

Muitas vezes o método do traçado de raios é implementado juntamente com o Método de Monte Carlo, dando origem ao *Monte Carlo Ray Tracing*. Neste método, tanto a posição de origem dos raios como seu ângulo de inclinação podem ser definidos por modelos estatísticos. Conforme WALKER (2013), o processo é preciso, mas muitos raios são necessários para um resultado significativo, o que causa um tempo computacional longo. A maioria dos programas de traçado de raios comerciais utilizam Monte Carlo.

Outro método de traçado de raios utilizado é o Edge Ray Tracing. Conforme SCALCO (2016), o método Edge Ray Tracing consiste em analisar o comportamento dos raios incidentes nas bordas de cada um dos espelhos. Assume-se que se os raios na borda dos espelhos foram calculados para atingir o absorvedor, então todos os raios entre as bordas irão também atingir o absorvedor. Outra simplificação é que se assume que os níveis de fluxo são homogeneamente distribuídos ao longo da largura da radiação incidente. Segundo WALKER (2013), esta é uma metodologia muito simples, mas pode fornecer resultados rápidos que são relativamente precisos, sendo aplicável principalmente em algoritmos de otimização no qual o tempo computacional deve ser mínimo para cada loop de otimização.

A técnica de traçado de raios pode ser desenvolvida através da escrita de códigos em programas como o MATLAB, mas também podem ser utilizados outros programas dedicados existentes. Um exemplo é o programa SolTrace.

2.16 O SOLTRACE

O SolTrace é um programa para traçado de raios desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL), dos Estados Unidos (WENDELIN; DOBOS; LEWANDOWSKI, 2013). Seu objetivo é modelar concentradores solares e avaliar seu desempenho. O SolTrace pode modelar vários tipos de concentradores, como CPC, disco parabólico, torre e o Fresnel linear. O programa utiliza a metodologia de traçado de raios, com o número de raios definido pelo usuário. Cada raio é traçado e interage com os componentes do sistema. A precisão aumenta com o número de raios traçados, ao custo de um maior tempo de processamento para concluir a avaliação. Na Figura 2.10 pode ser visualizada a interface do programa.

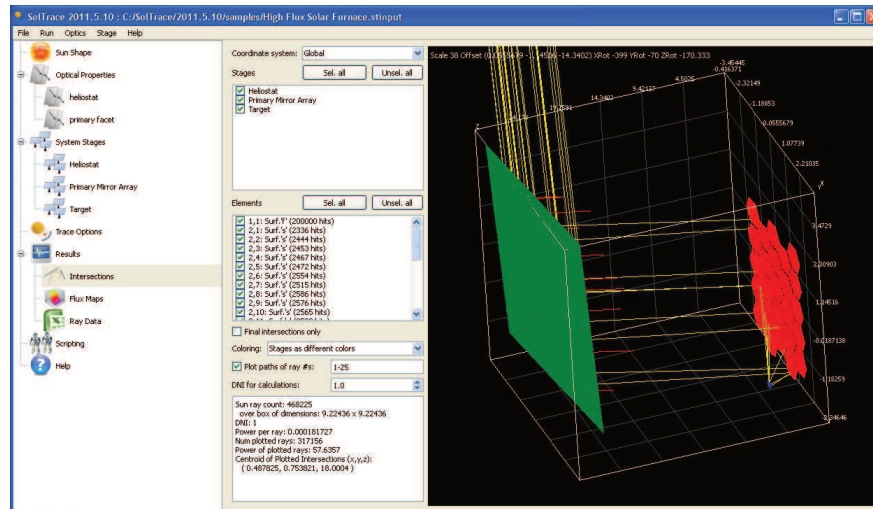


Figura 2.10 - Interface do programa SolTrace.

Fonte: NREL (2017).

Foram avaliados por YELLOWHAIR, CHRISTIAN e HO (2014) vários programas de traçado de raios disponíveis, capazes de modelar concentradores solares. Dentre os programas avaliados, estava o SolTrace. Os autores concluíram que o SolTrace possui vários pontos positivos, como uma interface gráfica, a possibilidade de modelar espelhos com vários formatos, poder importar dados medidos de superfície. Entre os pontos negativos está a necessidade de um grande número de raios para um resultado satisfatório, o que por consequência leva a um tempo de processamento computacional alto.

3 REFLETOR FRESNEL LINEAR

A tecnologia de refletor Fresnel linear herdou o nome das lentes Fresnel, que foram desenvolvidas pelo físico francês Augustin-Jean Fresnel no século XVIII. O princípio destas lentes é segmentar a superfície contínua das lentes padrão em um conjunto de superfícies com discontinuidades entre si. Isto permite uma redução substancial da espessura (e conseqüentemente do peso e volume) das lentes, mas causa também uma redução da qualidade da imagem projetada das lentes (GÜNTHER, 2011). Na Figura 3.1 é apresentada uma comparação entre uma lente convexa e um espelho parabólico com seus correspondentes que utilizam o princípio de Fresnel.

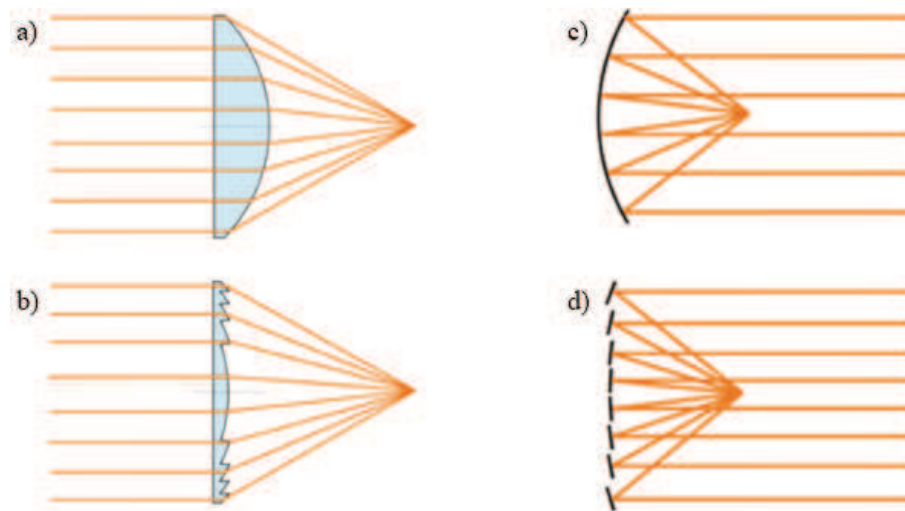


Figura 3.1 - Lente Fresnel (b) aproximando as características ópticas de uma lente convexa (a) e um espelho Fresnel (d) aproximando as características ópticas de um espelho parabólico (c).

Fonte: adaptado de GÜNTHER (2011).

O refletor Fresnel linear, mostrado na Figura 3.2 utiliza vários espelhos planos (ou levemente curvados) paralelos para concentrar a radiação solar no tubo absorvedor. Normalmente é instalado também um concentrador secundário, posicionado acima do tubo absorvedor para melhorar a relação de concentração e reduzir as perdas ópticas.

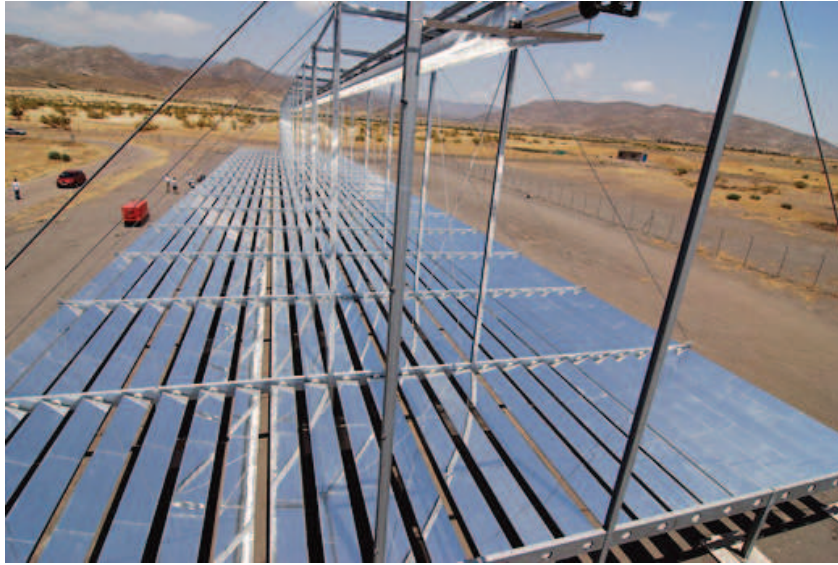


Figura 3.2 - Exemplo de um refletor Fresnel linear.

Fonte: SONNENENERGIE (2017).

Apesar de não ser tão eficiente opticamente quanto os concentradores tipo calha parabólica, estudos apontam que economicamente são mais viáveis, já que apresentam um custo de fabricação e operação inferiores.

Ao contrário do que acontece com os concentradores tipo calha parabólica, nos refletores Fresnel lineares o foco linear é distorcido pelo efeito de astigmatismo (IRENA, 2012). Por isso a necessidade de um refletor secundário para redirecionar os raios solares que não atingem diretamente o tubo absorvedor ou, a utilização de vários tubos absorvedores em paralelo, que formam um receptor multi-tubos que é largo o suficiente para interceptar ao máximo a radiação solar, sem a necessidade de um concentrador secundário. Na Figura 3.3 pode ser observado dois exemplos de concentradores secundários.

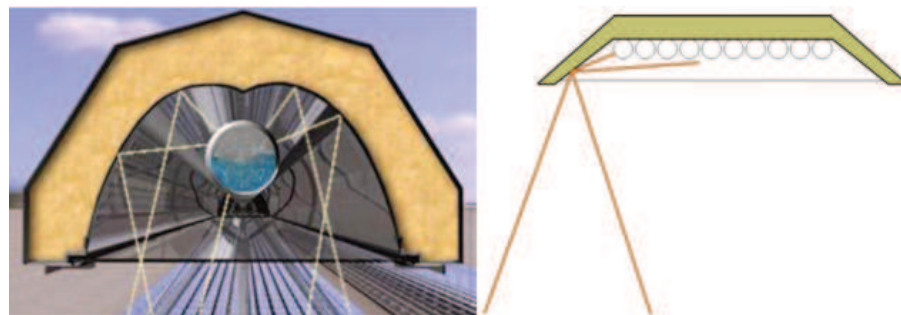


Figura 3.3 - Exemplos de concentrador secundário de simples tubo (esquerda) e múltiplos tubos (direita).

Fonte: GÜNTHER (2011).

3.1 HISTÓRIA DOS SISTEMAS FRESNEL LINEARES

O primeiro trabalho significativo da tecnologia de refletores Fresnel lineares foi realizado e patenteado pelo matemático autodidata Giovanni Francia, na Itália em 1964 (ZHU et al., 2014). Na Figura 3.4 pode ser visualizado o protótipo. A partir do trabalho de Francia, muitos refletores Fresnel lineares foram projetados e testados.



Figura 3.4 - Protótipo um refletor Fresnel linear, construído por Francia, em 1964.

Fonte: ZHU et al. (2014).

Em 1979, o Departamento Americano de Energia (DOE) conduziu um extenso estudo da tecnologia de concentradores Fresnel lineares, e concluiu que é uma tecnologia economicamente viável (DI CANIO et al. (1979) apud ZHU et al. (2014)). Subsequentemente, a tecnologia atraiu o interesse de muitos pesquisadores pelo mundo.

De acordo com HÄBERLE (2013) no final da década de 90, dois grupos reiniciaram o desenvolvimento da tecnologia dos LFR, a empresa australiana Solar Heat and Power, que posteriormente veio a se chamar AUSRA, e a empresa belga Solarmundo. Em 2006 uma nova companhia chamada Novatec Biosol, que foi renomeada para Novatec Solar e juntou-se ao grupo alemão ABB, anunciou a primeira usina de produção de eletricidade de 1,4 MW, utilizando a tecnologia de LFR.

3.2 ESTUDOS RELEVANTES COM SISTEMAS FRESNEL LINEARES

MATHUR, KANDPAL e NEGI (1991) estudaram a distribuição da radiação refletida pelos espelhos no plano de entrada do absorvedor para o horário de meio dia ($\theta_z=0$).

Simularam um LFR com 1 m de abertura, com espelhos planos e absorvedor a 0,5 m de altura. Para o traçado de raios, definiram 1000 pontos para geração dos raios solares, acima do campo de espelhos, e em cada ponto geraram 33 raios solares, sendo o central com mesma direção de um vetor Terra-Sol e outros 16 para cada lado, com ângulo de 1' entre eles, formando um cone. Com isso, avaliaram quais raios, após interagirem com os espelhos, se perderam e quais chegaram ao absorvedor e sua distribuição no absorvedor.

MERTINS (2009) avaliou tecnicamente e economicamente os refletores Fresnel lineares, analisando o custo nivelado da energia elétrica produzida (LEC) em função dos diversos parâmetros construtivos dos LFR e comparou com a tecnologia CPC. Simulou uma usina de 50 MW situado na cidade de Faro, em Portugal, utilizando ambas as tecnologias. Utilizando LFR, a energia solar anual convertida em eletricidade, foi menor que aquela obtida com a tecnologia CPC. Porém, de acordo com os parâmetros utilizados, quando comparado o custo total de conversão de energia, o valor para ambas as tecnologias foi equivalente.

LIN et al. (2013) utilizaram a metodologia de traçado de raios para definir os parâmetros construtivos de um LFR. Para considerar o efeito do ângulo subtendido do Sol, cada espelho foi dividido em 300 divisões, e a partir de cada divisão, foram traçados 33 raios, com ângulo de 1' entre eles, formando um cone. As simulações foram realizadas para o horário de meio dia ($\theta_z=0$). Então, o ponto de intersecção de cada um destes raios com o plano de entrada do absorvedor foi determinado.

WALKER (2013) projetou e construiu um refletor Fresnel linear de baixo custo, com orientação norte-sul. O objetivo do trabalho não foi produzir vapor e sim demonstrar o funcionamento da tecnologia. Desenvolveu um código de traçado de raios em MATLAB para otimizar os parâmetros, que foram utilizados para construção do protótipo. Os testes mostraram que o desempenho obtido pelo protótipo foi satisfatoriamente comparável com o modelo desenvolvido em MATLAB.

BITTENCOURT et al. (2015) desenvolveram um modelo numérico para avaliar a eficiência óptica de um coletor solar tipo refletor Fresnel linear. O objetivo era utilizar este modelo para obter os parâmetros necessários à construção de um refletor Fresnel linear para o laboratório da UFSC, tendo como restrições parâmetros de custo e espaço físico para

instalação do concentrador. O modelo desenvolvido foi validado com o uso do programa SolTrace.

MULLER (2016), realizou um estudo geométrico de um refletor Fresnel linear para produção de energia térmica. Para a análise, desenvolveu um código em MATLAB utilizando a técnica Edge Ray-tracing. Conseguiu avaliar a potência incidente no plano de entrada do absorvedor e as perdas do sistema. Também construiu um protótipo para movimentação dos espelhos em um LFR.

3.3 VANTAGENS DOS REFLETORES FRESNEL LINEARES

Apesar de não ser tão eficiente opticamente quanto os concentradores tipo calha parabólica, estudos apontam que os LFR são economicamente mais viáveis, já que apresentam um custo de fabricação e operação inferiores. O custo com espelhos é, por exemplo, inferior aos sistemas de concentradores com calha parabólica, já que podem ser utilizados espelhos planos ou levemente curvados, que são de menor espessura e de mais fácil fabricação. Estudos realizados por LANCEREAU et al. (2015) compararam a carga devido ao vento em concentradores Fresnel e em concentradores tipo calhas parabólicas. Os resultados apontam que refletores Fresnel operam com cargas devido ao vento muito inferiores ao sistema de calhas parabólicas. Isto leva a uma redução na robustez das estruturas e sistema de ajuste do ângulo dos espelhos e, por consequência, uma redução também no custo.

3.4 GEOMETRIA DO REFLETOR FRESNEL LINEAR

O refletor Fresnel linear necessita de um controle muito preciso para os ângulos de inclinação dos espelhos. Erros nesta inclinação afetam diretamente a eficiência do sistema, pois a radiação solar não será refletida para o absorvedor, ou se perderá em parte, sendo devolvida para o espaço. Assim, durante o dia, o sistema ajusta continuamente o ângulo de inclinação dos espelhos para que a radiação seja refletida para o absorvedor.

Quanto ao eixo de movimentação dos espelhos, sua orientação é usualmente adotada como sendo no sentido Norte-Sul ou Leste-Oeste. De acordo com GÜNTHER (2011), para locais situados na faixa de latitude 15° e 40° , em ambos os hemisférios, a orientação Norte-

Sul do eixo proporciona uma maior conversão de energia anual, porém a orientação Leste-Oeste proporciona uma conversão de energia mais equilibrada ao longo do ano, com menores picos no verão e também menores vales no inverno. Neste trabalho, será utilizada a orientação Norte-Sul para o eixo de rotação dos espelhos. Na Figura 3.5 é possível observar uma representação destas direções. O eixo x positivo equivale ao leste, o eixo y positivo equivale ao sul e o eixo z positivo equivale ao zênite local.

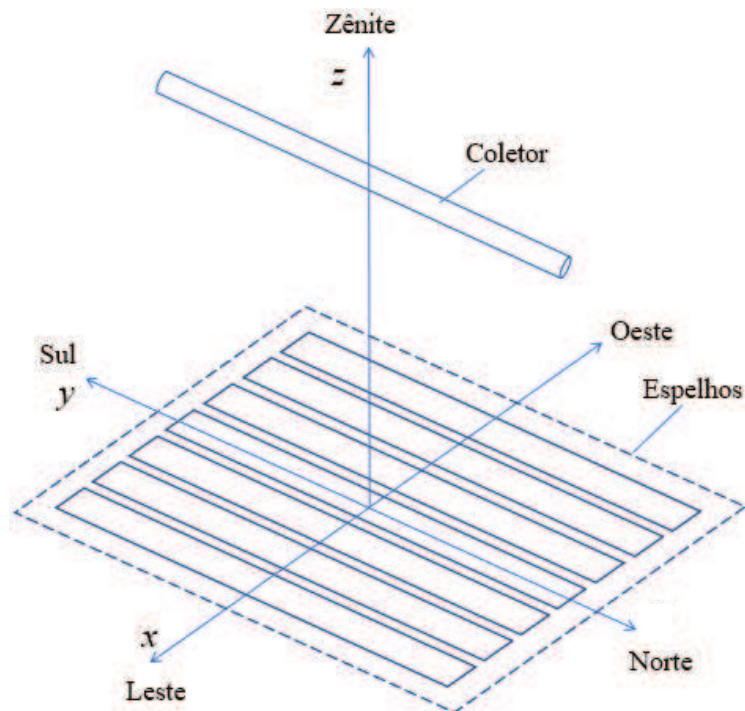


Figura 3.5 - Sistema de coordenadas para concentrador Fresnel linear.

Além do ângulo α (elevação solar) introduzido na Figura 2.4, é apresentado na Figura 3.6 os ângulos α_L (elevação solar longitudinal) e α_T (elevação solar transversal), que são as projeções do ângulo α sobre os planos formados pelos eixos y e z e x e z , respectivamente.

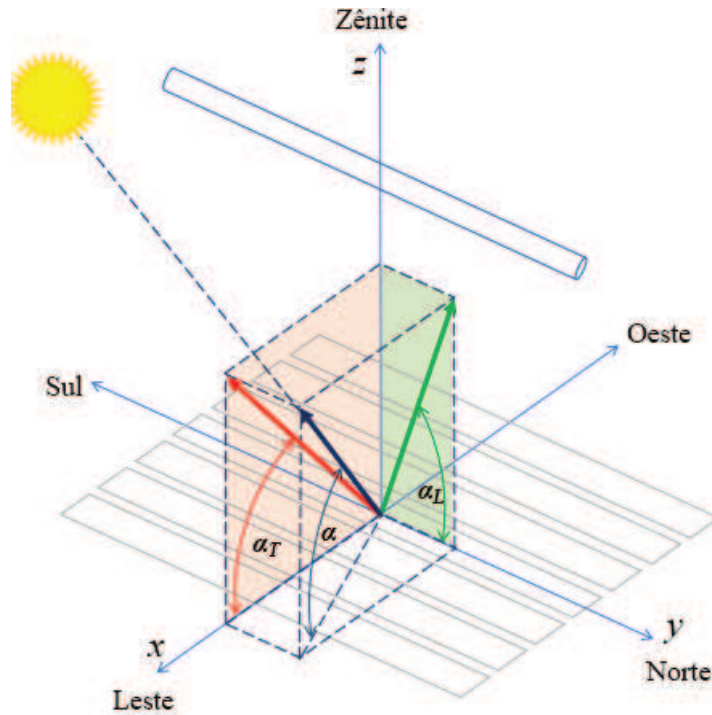


Figura 3.6 - Ângulos de elevação solar longitudinal e transversal.

Os ângulos α_L e α_T podem ser calculados pelas Equações (3.1) e (3.2), respectivamente.

$$\alpha_L = 90^\circ - \tan^{-1}(|\cos \gamma| \tan \theta_z) \quad (3.1)$$

$$\alpha_T = 90^\circ + \tan^{-1}(\text{sen} \gamma \tan \theta_z) \quad (3.2)$$

Na Figura 3.7 são apresentadas as definições das medidas do espaçamento entre espelhos (e), da largura dos espelhos (Le), da altura do coletor em relação ao campo de espelhos (h_C) e da distância horizontal do centro do espelho até absorvedor (Q_i).

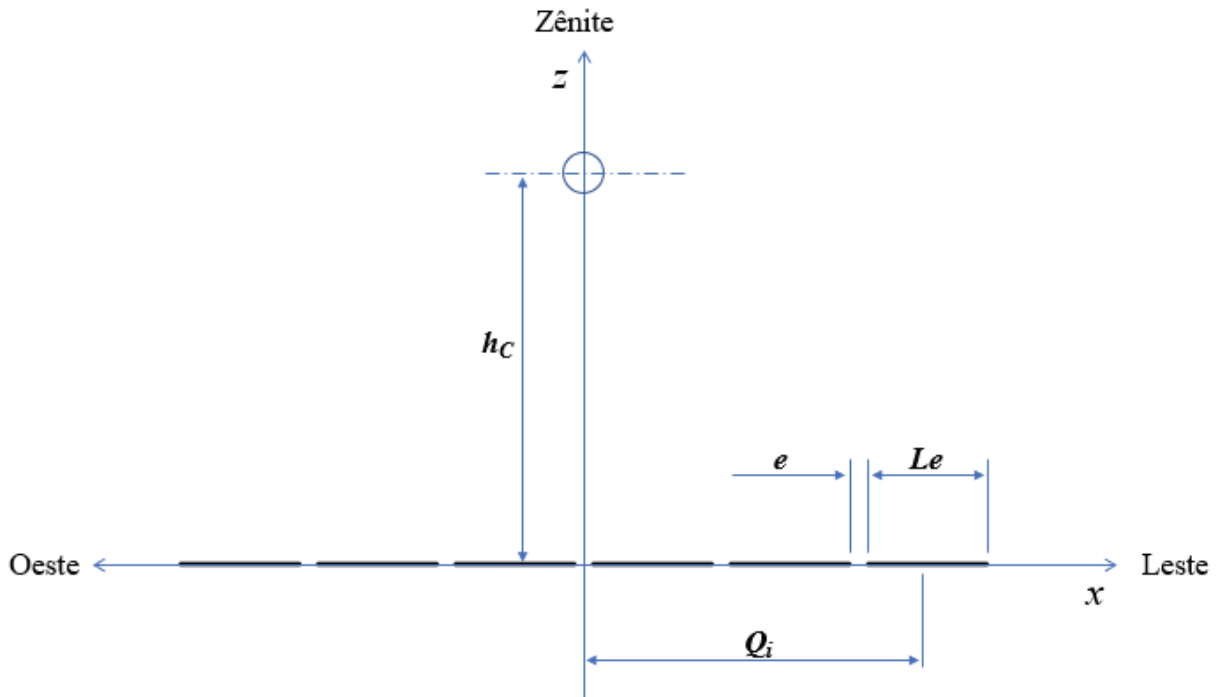


Figura 3.7 - Dimensões do refletor Fresnel linear.

Os ângulos de inclinação dos espelhos (φ_i), a elevação solar transversal (α_T), e o ângulo formado entre o plano do campo de espelhos e a linha reta do centro do espelho até o absorvedor (β_i), são apresentados na Figura 3.8.

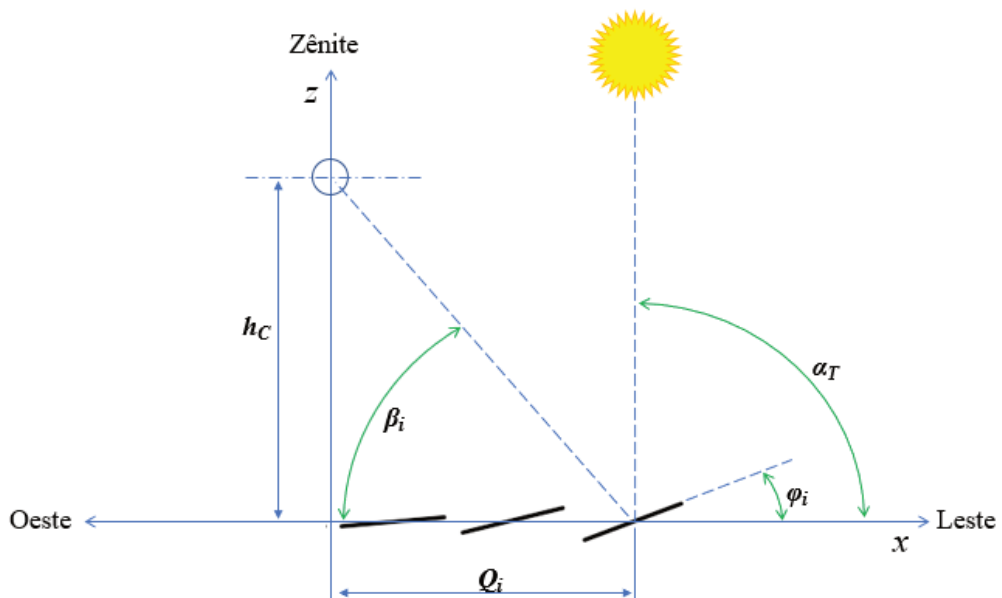


Figura 3.8 - Definição dos ângulos do refletor Fresnel linear.

O ângulo formado entre o plano do campo de espelhos e a linha reta do centro do espelho até o coletor (β_i) pode ser calculado utilizando-se a Equação (3.3).

$$\beta_i = \arctan\left(\frac{h_c}{Q_i}\right) \quad (3.3)$$

Já o ângulo de inclinação dos espelhos (φ_i) pode ser calculado utilizando a Equação (3.4).

$$\varphi_i = \left(\frac{\alpha_r + \beta_i}{2}\right) \quad (3.4)$$

3.5 EFICIÊNCIA GEOMÉTRICA

BITTENCOURT et al. (2015) utilizaram para avaliar o desempenho de um LFR a eficiência geométrica (η_{geo}). Conforme HÄBERLE (2013), para definição da eficiência do LFR, é importante definir uma área de referência, sobre a qual a irradiância incide. Nos PTC, a área de referência é definida como a projeção do refletor em um plano transversal ao Sol. Por similaridade, para os LFR normalmente é considerado a área de abertura como área de referência. Além disso, muitos trabalhos que avaliam a eficiência do LFR, levam em consideração a avaliação apenas em um determinado horário do dia. Este horário escolhido é, em geral, a posição de maior radiação, que é próximo ao horário do meio-dia. Para que seja feita uma análise mais abrangente, optou-se neste trabalho por avaliar a eficiência em termos de energia ao longo de um dia. Assim, o parâmetro para comparar diferentes configurações do LFR será a eficiência geométrica (η_{geo}), que está representada na Equação (3.5).

$$\eta_{geo} = \frac{\int Pot_{abs} dt}{\int Pot_{disp} dt} \quad (3.5)$$

onde Pot_{abs} é a potência que foi refletida e incidiu no absorvedor e Pot_{disp} é a potência disponível, conforme Equação (3.6).

$$Pot_{disp} = apertDNIce \quad (3.6)$$

onde ce é o comprimento dos espelhos do LFR.

3.6 PERDAS ÓPTICAS

As perdas ópticas são as principais desvantagens dos refletores Fresnel lineares em relação aos concentradores tipo calhas parabólicas (GÜNTHER, 2011). As perdas ópticas que serão avaliadas neste trabalho, e que serão apresentadas nos subcapítulos subsequentes, são sombreamento e bloqueio entre espelhos, perdas de final de linha, perdas por sombreamento do absorvedor, efeito cosseno e perdas entre espelhos. Neste trabalho, os espelhos serão considerados como ideais, desta forma, perdas ópticas causadas por imperfeições na superfície dos espelhos, não serão consideradas.

3.6.1 Perdas por bloqueio e sombreamento

Como os espelhos são posicionados em eixos paralelos e ficam inclinados, ocorre que partes de um espelho ficam escondidas atrás de outro espelho, originando as perdas por sombreamento, como representado na Figura 3.9. Também pode ocorrer que os raios solares sejam refletidos na parte inferior do espelho adjacente, causando a perda por bloqueio, como mostrado na Figura 3.10.

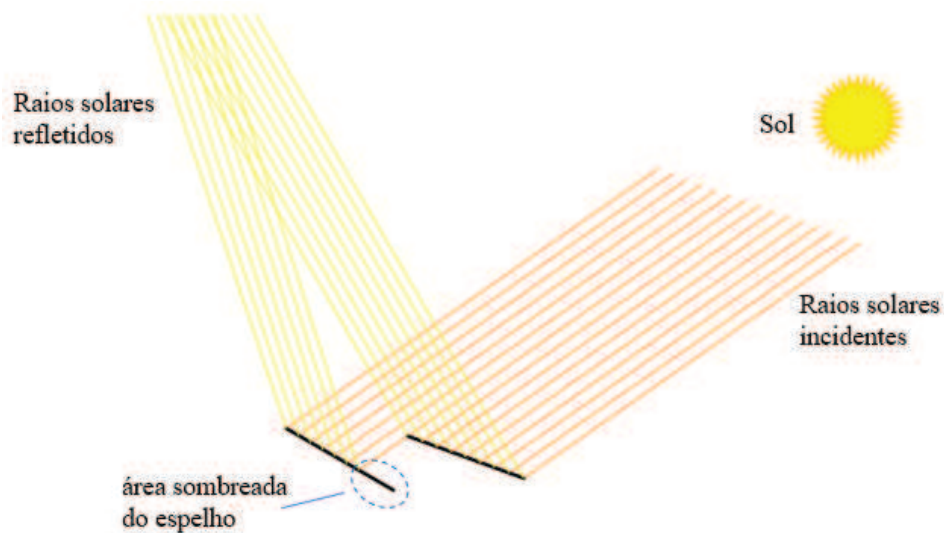


Figura 3.9 - Perdas por sombreamento entre espelhos adjacentes.

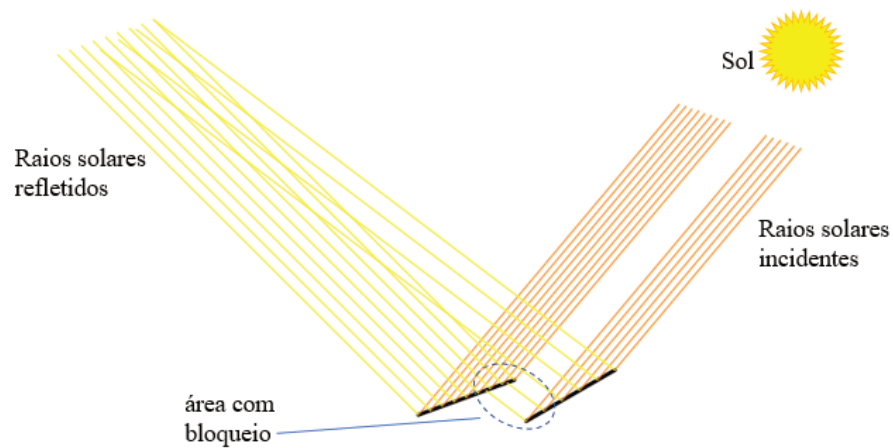


Figura 3.10 - Perdas por bloqueio entre espelhos adjacentes.

3.6.2 Perdas de final de linha

O Sol, em sua trajetória aparente em relação à Terra, apresenta variação na elevação solar (α). O movimento dos espelhos ocorre na direção transversal (α_T), compensando o movimento aparente do Sol neste eixo. No entanto, o movimento solar ocorre também na direção longitudinal (sentido norte-sul), e neste eixo não há movimentação dos espelhos ou do absorvedor. Assim, parte do absorvedor não é atingido pelos raios refletidos, tornando-se inativa para fins de transferência de calor. As perdas por este efeito são chamadas de perdas de final de linha e estão representadas na Figura 3.11.

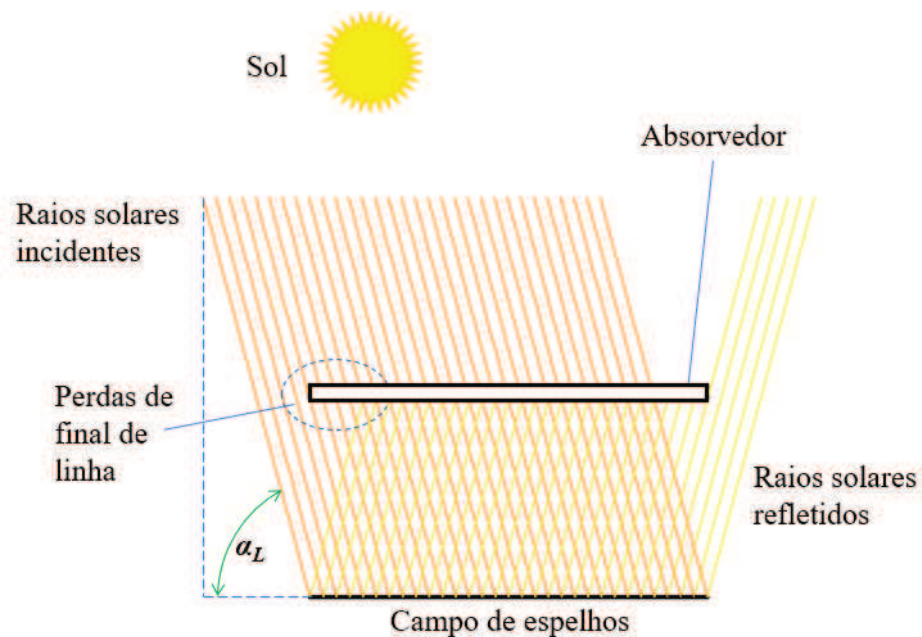


Figura 3.11 - Representação das perdas de final de linha.

3.6.3 Perdas por sombreamento do absorvedor

Outro efeito que tem grande potencial de perda para os LFR é o sombreamento causado pelo absorvedor sobre o campo de espelhos. A superfície superior do absorvedor é normalmente composta por isolante térmico, para evitar a perda de calor, tornando a radiação incidente nesta área inútil. Na Figura 3.12 pode ser observado uma representação do efeito do sombreamento pelo absorvedor.

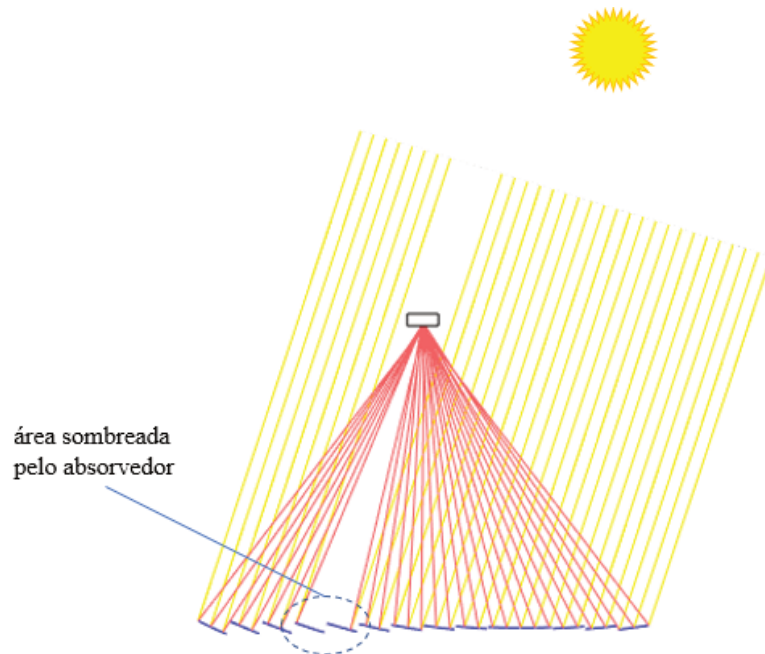


Figura 3.12 - Representação da perda por sombreamento do absorvedor.

3.6.4 Efeito cosseno

Quando a superfície reflexiva for perpendicular à direção da radiação solar, a irradiância refletida será máxima. Porém se a superfície não estiver perpendicular à direção da radiação solar, a irradiância será reduzida pelo cosseno do ângulo entre a normal da superfície e a direção da radiação solar. Isto ocorre em função da redução da área projetada do elemento reflexivo no plano perpendicular à radiação. O efeito é uma redução da potência refletida pelo conjunto de espelhos. Na Figura 3.13 pode-se observar dois espelhos com mesma área, porém com ângulos entre a normal da superfície reflexiva e a direção dos raios solares diferentes. O da esquerda recebe (e por consequência reflete) mais radiação enquanto que o da direita, em função da redução da área projetada, recebe menos radiação.

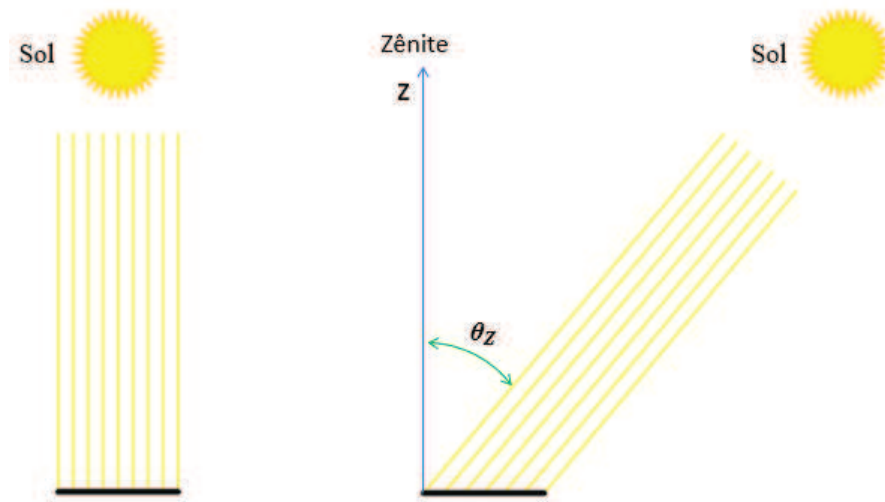


Figura 3.13 - Perdas pelo efeito cosseno.

3.6.5 Perdas entre espelhos

Devido ao movimento dos espelhos, a área projetada dos espelhos, perpendicular à direção da radiação, sofre uma redução, possibilitando que parte da radiação passe por entre os espelhos, não sendo refletida para o absorvedor. Este efeito é ampliado pelo espaçamento entre espelhos, que é necessário para que não ocorram interferências entre eles durante o movimento de giro dos espelhos. Na Figura 3.14 é mostrada uma representação das perdas entre espelhos.

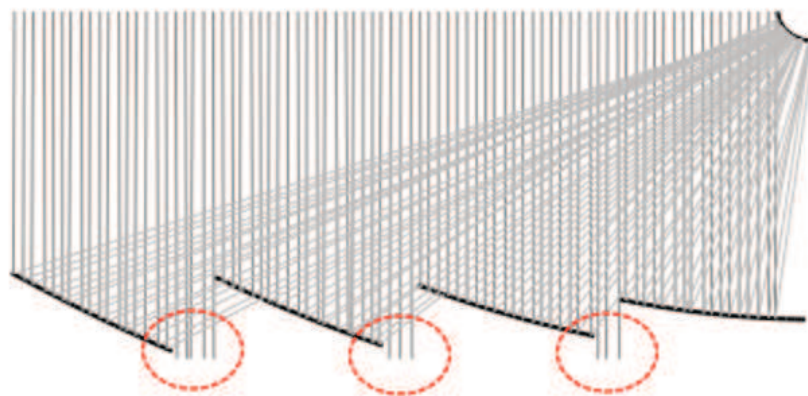


Figura 3.14 - Perdas entre espelhos.

Fonte: MERTINS (2009).

3.7 CURVATURA DE ESPELHOS PARABÓLICOS E CILÍNDRICOS

Serão apresentados, nas seções subsequentes, as equações que definem a curvatura dos espelhos parabólicos e cilíndricos.

3.7.1 Espelhos parabólicos

Os espelhos com formato parabólico apresentam o perfil de uma parábola finita, limitada pela largura do espelho. Na Figura 3.15 encontra-se a representação do perfil de um espelho de formato parabólico.

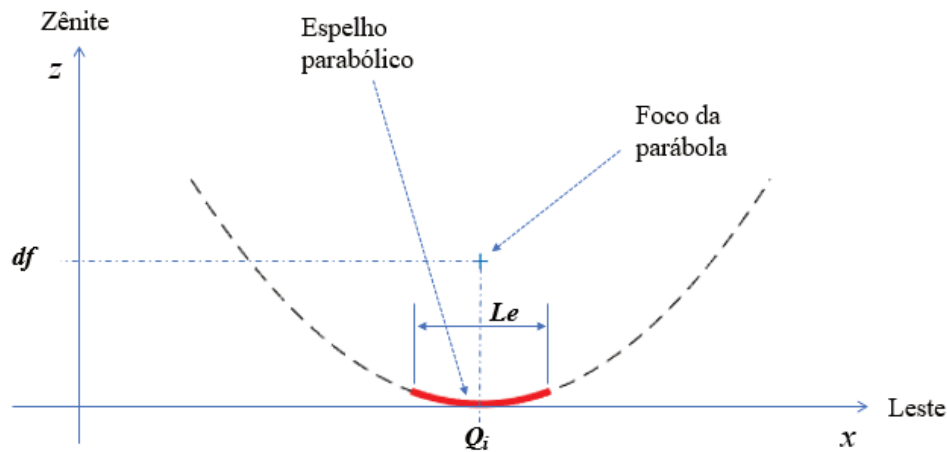


Figura 3.15 - Espelho parabólico.

O formato do espelho parabólico é definido pela Equação (3.7).

$$z = \left(\frac{1}{4df} \right) (x - Q_i)^2 \quad (3.7)$$

onde df é a distância focal e Q_i é a distância do eixo do espelho ao centro do LFR.

Uma característica do espelho parabólico e também sua maior vantagem na aplicação de concentradores de calha parabólica é a de que os raios solares, quando paralelos ao seu eixo de simetria, são todos refletidos para um mesmo ponto (em 2D ou linha em 3D), independentemente da largura do espelho. Na Figura 3.16 está representado um espelho parabólico juntamente com a definição do ângulo de borda (ψ_{rim}), que é o ângulo formado pela mediatriz do espelho e uma linha ligando o ponto focal do espelho a uma de suas bordas.

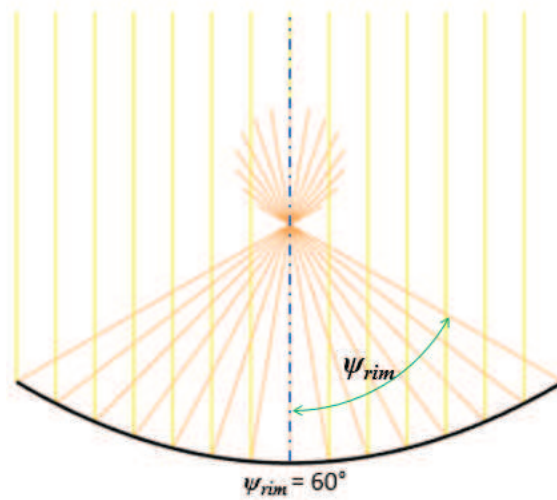


Figura 3.16 - Concentração dos raios solares refletidos no foco de um espelho parabólico.

Porém, quando a direção dos raios solares não for paralela ao eixo de simetria da parábola, ocorrerá o efeito conhecido como astigmatismo, e não existirá mais um ponto de concentração e sim uma região de maior concentração. Na Figura 3.17 é possível observar o efeito do astigmatismo em função da elevação solar transversal (α_T) em espelhos parabólicos com seu eixo de simetria na posição vertical.

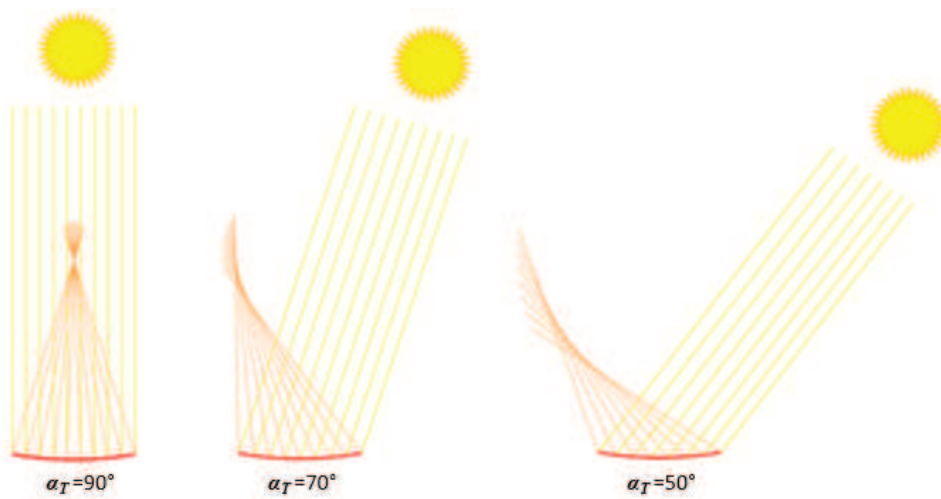


Figura 3.17 - Efeito do astigmatismo em espelhos parabólicos.

3.7.2 Espelhos cilíndricos

Os espelhos com formato cilíndrico apresentam o perfil de uma circunferência, limitada pela largura do espelho. Na Figura 3.18 encontra-se a representação de um espelho em formato cilíndrico. Ele é determinado pela largura (Le) e pelo raio (Re).

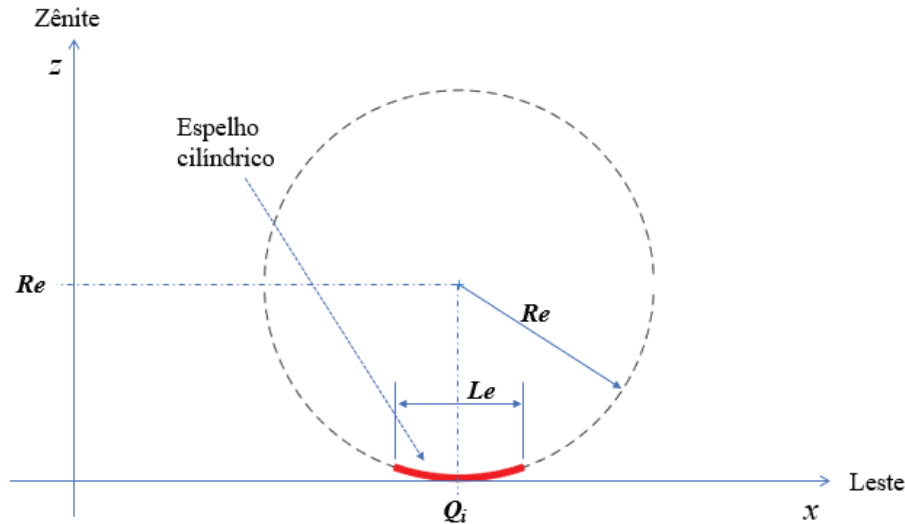


Figura 3.18 - Representação geométrica de um espelho cilíndrico.

Para espelhos cilíndricos com a sua base paralela ao eixo x ($z=0$), e deslocado no eixo x a uma distância Q_i do centro do absorvedor, utiliza-se a Equação (3.8), que não representa toda a circunferência, mas somente a sua parte inferior.

$$z = Re - \sqrt{Re^2 - (x - Q_i)^2} \quad (3.8)$$

Uma característica dos espelhos cilíndricos é que não possuem um ponto focal. Logo, nem mesmo os raios solares que são paralelos ao eixo de simetria do espelho são direcionados a um único ponto. Porém, pode ser observado na Figura 3.19 que, quando a abertura do espelho for pequena (ângulo de borda, ψ_{rim} , pequeno), o espelho cilíndrico apresenta um comportamento muito próximo ao espelho parabólico, com os raios solares se concentrando na região correspondente à metade do raio da curvatura do espelho.

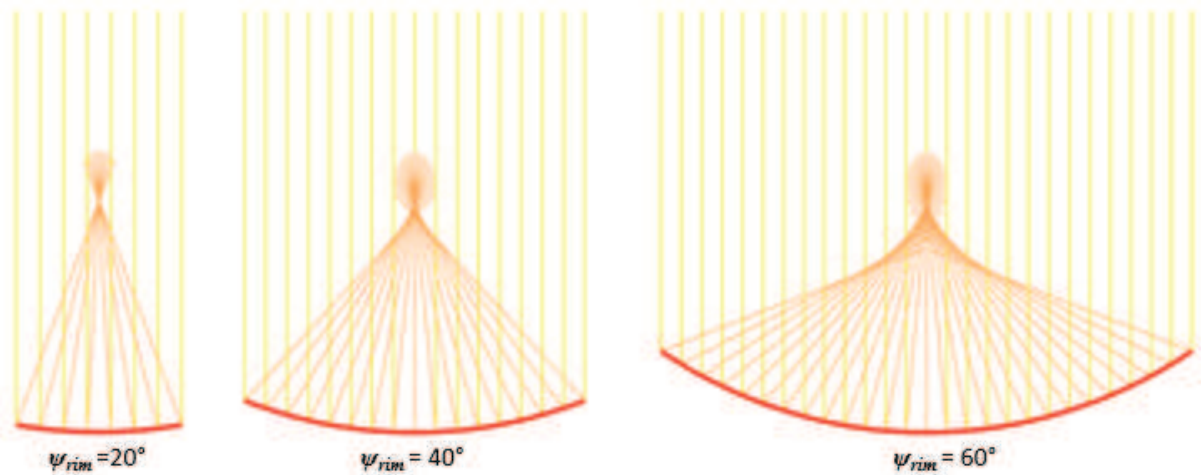


Figura 3.19 - Efeito da abertura do espelho cilíndrico na variação do ponto focal.

Assim como nos espelhos parabólicos, os espelhos cilíndricos também apresentam o efeito de astigmatismo. Na Figura 3.20 é apresentado um exemplo do efeito do astigmatismo em função da elevação solar transversal (α_T) em espelhos cilíndricos com seu eixo de simetria na posição vertical.

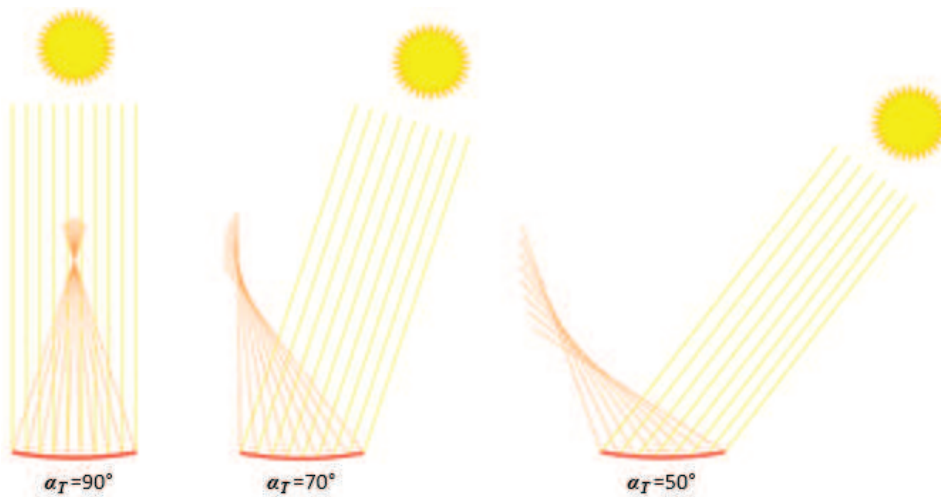


Figura 3.20 - Efeito do astigmatismo em espelhos cilíndricos.

3.8 LARGURA DO ABSORVEDOR

CHAVES (2016) avaliou o comportamento da radiação refletida por um refletor Fresnel linear com espelhos planos em um absorvedor. Seu objetivo era determinar a largura

mínima do absorvedor para interceptar a radiação refletida pelos espelhos. Ele avaliou o caso ideal, em que seriam utilizados um número infinito de espelhos planos, com largura infinitamente pequena, sem espaçamento entre os espelhos. Desta forma, o campo de espelhos se tornaria um refletor Fresnel linear contínuo, como pode ser visto na Figura 3.21.

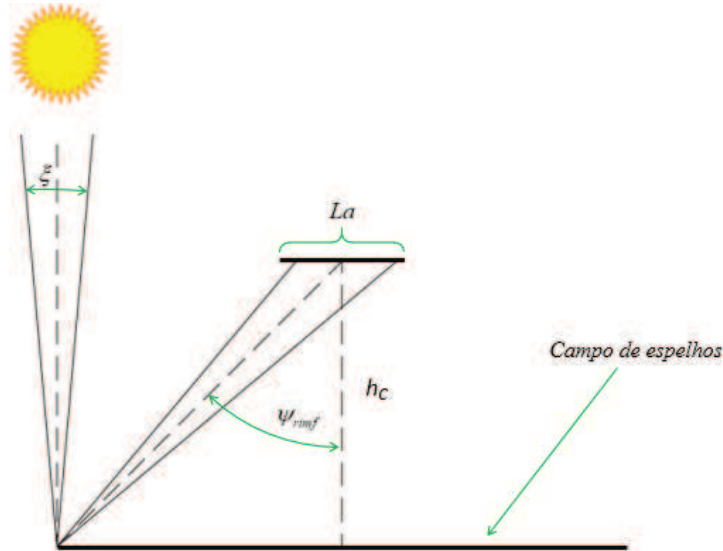


Figura 3.21 - Refletor Fresnel linear contínuo.

Para esta condição, definiu a largura do absorvedor (La) pela Equação (3.9).

$$La = 2h_c \sin\left(\frac{\xi}{2}\right) / \cos^2 \psi_{rimf} \quad (3.9)$$

onde La é a largura do absorvedor, h_c é a altura do absorvedor, ξ é o ângulo solar, ψ_{rimf} é o ângulo de borda do refletor Fresnel linear.

A Equação (3.9) será avaliada posteriormente com o código desenvolvido em MATLAB.

4 METODOLOGIA

Nos subcapítulos a seguir, serão descritos os passos para desenvolvimento do código em MATLAB e a sua validação utilizando o SolTrace.

4.1 O DESENVOLVIMENTO DO CODIGO EM MATLAB

Para avaliar a irradiância concentrada no plano do absorvedor, foi utilizada a técnica de traçado de raios. Na Figura 4.1 é apresentado um fluxograma básico do código desenvolvido em MATLAB.

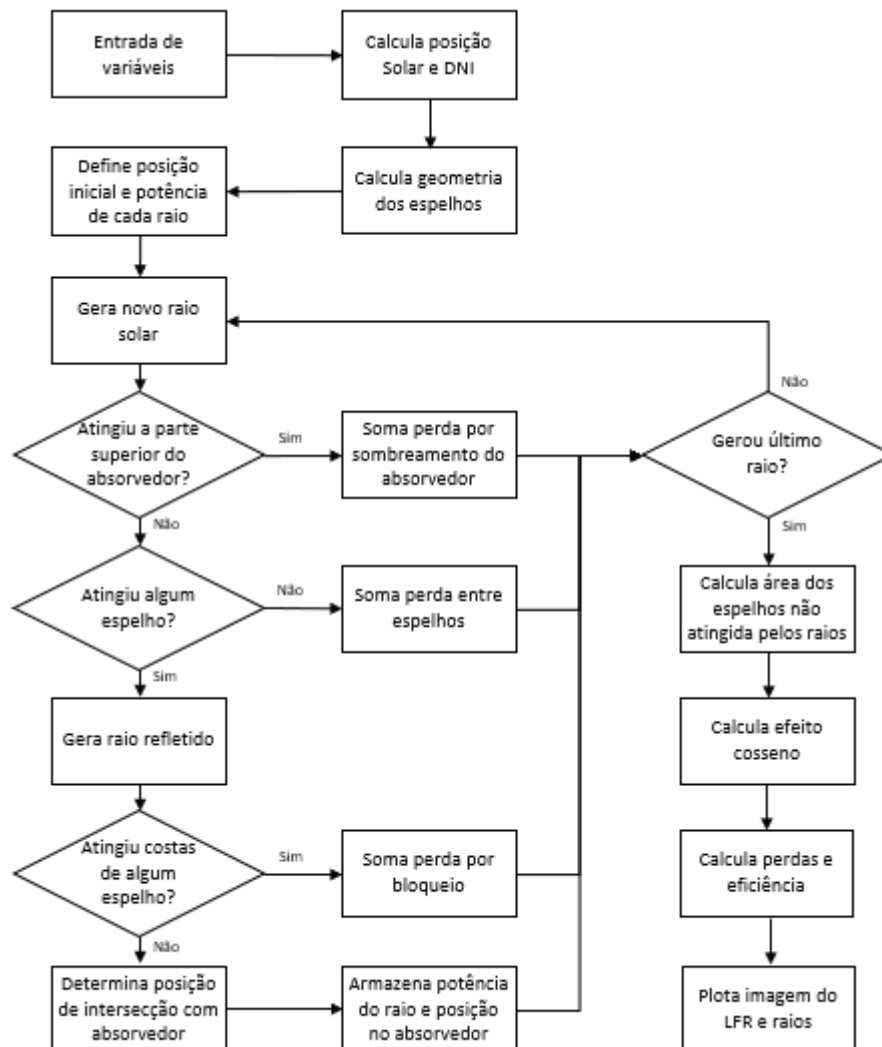


Figura 4.1 - Fluxograma do código desenvolvido no MATLAB para traçado de raios.

Como pode ser observado na Figura 4.1, após a definição dos dados de entrada (dimensões do LFR, quantidade de raios a gerar, data e horário), o código calcula a irradiância direta normal (DNI) utilizando o modelo ESRA, posição aparente do Sol e a geometria dos espelhos. Os pontos de origem dos raios solares também são definidos, bem como o ângulo de cada raio e sua potência, de acordo com o modelo de BUIE, apresentado no subcapítulo 2.11.

Com as etapas anteriores concluídas, o código inicia o traçado dos raios. Para cada raio gerado, ele primeiro verifica se atingiu a parte superior do absorvedor. Se sim, considera como perda por sombreamento do absorvedor, já que este raio não atinge nenhum espelho e não será refletido para a abertura do absorvedor. Se não atingiu o absorvedor, ele verifica se atingiu algum espelho. Se não atingiu nenhum espelho, é porque o raio passou por entre os espelhos, e será contabilizado como perda de radiação entre os espelhos. Se atingiu algum espelho, o código verifica o ponto de intersecção com o espelho, a inclinação e a normal do espelho neste ponto e traça o raio refletido. Caso o raio refletido atinja a superfície inferior (não reflexiva) de outro espelho do LFR, é considerado como uma perda por bloqueio. Caso o raio refletido não atinja nenhum outro espelho, é verificado qual o ponto que ele atingiu no plano de entrada do absorvedor. Depois de traçar o último raio, o código verifica quais foram as regiões dos espelhos que não foram atingidas por nenhum raio para determinar a área sombreada e a potência não refletida por esta região. Também verifica o ângulo de inclinação dos espelhos em relação ao ângulo de elevação solar transversal, para verificar a perda de área projetada dos espelhos pelo efeito cosseno.

4.2 A POTÊNCIA DOS RAIOS SOLARES

Os raios solares, que representam a radiação solar, são pontos chave no desenvolvimento do programa. Para uma análise de qualidade, a quantidade de raios gerada pelo sistema é fator determinante. A quantidade de raios solares gerada (n_{rs}) neste trabalho não é determinada diretamente, mas indiretamente pelo que foi aqui chamado de densidade de pontos de geração de raios solares ($dens_{pgrs}$) e do número de raios por ponto (n_{rpp}) conforme as Equações (4.1) e (4.2).

$$n_{rs} = n_{pgrs} n_{rpp} \quad (4.1)$$

onde n_{pgrs} é o número de pontos de geração de raios solares que, de acordo com a Equação (4.2) é dado por.

$$n_{pgrs} = dens_{pgrs} \cdot apert_{proj} \quad (4.2)$$

onde $apert_{proj}$ é a área de abertura dos espelhos, projetada perpendicularmente ao Sol.

A área de abertura dos espelhos projetada ($apert_{proj}$), equivale a projeção da área de abertura dos espelhos, perpendicular ao vetor Terra-Sol. Na Figura 4.2 pode-se observar uma simulação com 23 raios solares gerados e a representação da $apert_{proj}$.

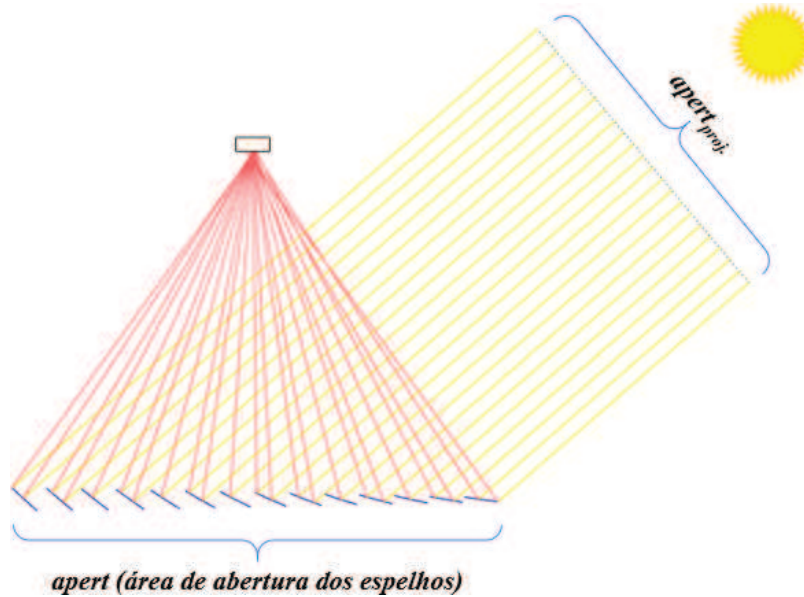


Figura 4.2 - Simulação com geração de 23 raios solares e representação da $apert_{proj}$.

Para determinação da potência incidente (Pot_{inc}) sobre a área de abertura dos espelhos, foi levado em consideração a área projetada da abertura, perpendicular ao Sol, e a irradiância, conforme Equação (4.3).

$$Pot_{inc} = DNI \cdot apert_{proj} \quad (4.3)$$

onde $apert_{proj}$ é a abertura projetada da região dos espelhos, perpendicular ao Sol.

A potência por ponto (Pot_{pp}), é definida conforme a Equação (4.4).

$$Pot_{pp} = \frac{Pot_{inc}}{n_{pgrs}} \quad (4.4)$$

em que n_{pgrs} é o número de pontos de geração dos raios solares.

Em cada ponto de geração dos raios solares, podem ser gerados vários raios, de acordo com outro parâmetro, que é o número de raios por ponto (n_{rpp}). Quando o n_{rpp} for igual a 1 (como no exemplo da Figura 4.2) existirá apenas um raio por ponto de geração dos raios solares com potência $Pot_{pr(i)}$ de cada raio i igual a Pot_{pp} .

Quando o n_{rpp} for maior que 1, os ângulos dos raios para um mesmo ponto irão variar entre -20 mrad e $+20$ mrad, com a potência de cada raio definida pelo modelo de BUIE, conforme Equação (2.15). Na Figura 4.3 é apresentado uma simulação com 23 pontos de geração de raios solares e 3 raios solares por ponto.

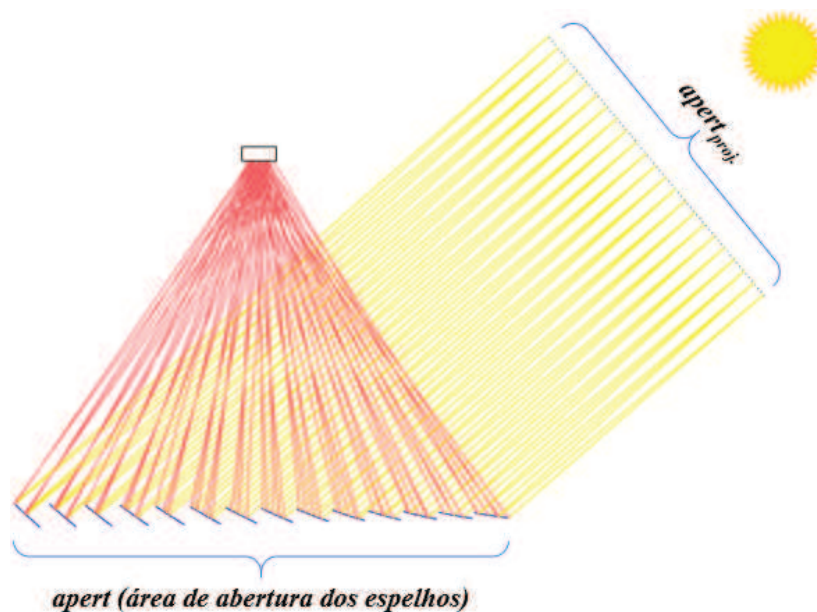


Figura 4.3 - Simulação com 23 pontos de geração de raios solares e 3 raios solares por ponto.

À medida que o número de raios solares aumenta, mais uniforme se torna a distribuição. Na Figura 4.4 pode ser observado uma simulação 150 pontos de geração de raios solares e 21 raios por ponto, totalizando 3150 raios.

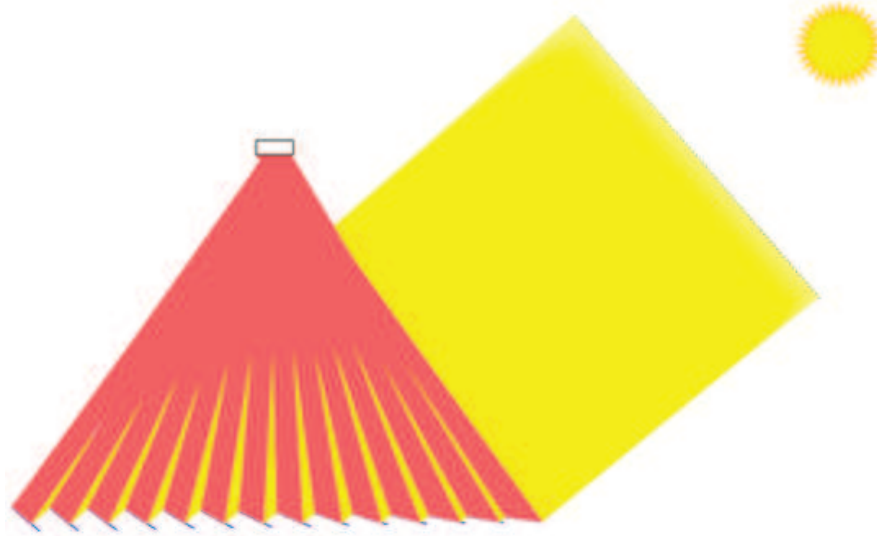


Figura 4.4 - Simulação com 150 pontos de geração de raios solares e 21 raios por ponto.

4.3 O CÁLCULO DA POTÊNCIA INCIDENTE NO PLANO DO ABSORVEDOR

O programa de traçado de raios fornece uma tabela com as posições e potência de cada raio que atingiu o plano do absorvedor. Pelo somatório da potência dos raios que atingem o absorvedor é possível obter a potência incidente no plano do absorvedor. Adicionalmente, é também possível obter a distribuição da potência em função da posição x no absorvedor. Na Figura 4.5 é apresentado um exemplo com destaque para a região de entrada do absorvedor. Com isto, é possível obter a distribuição de potência ao longo do plano de entrada do absorvedor.

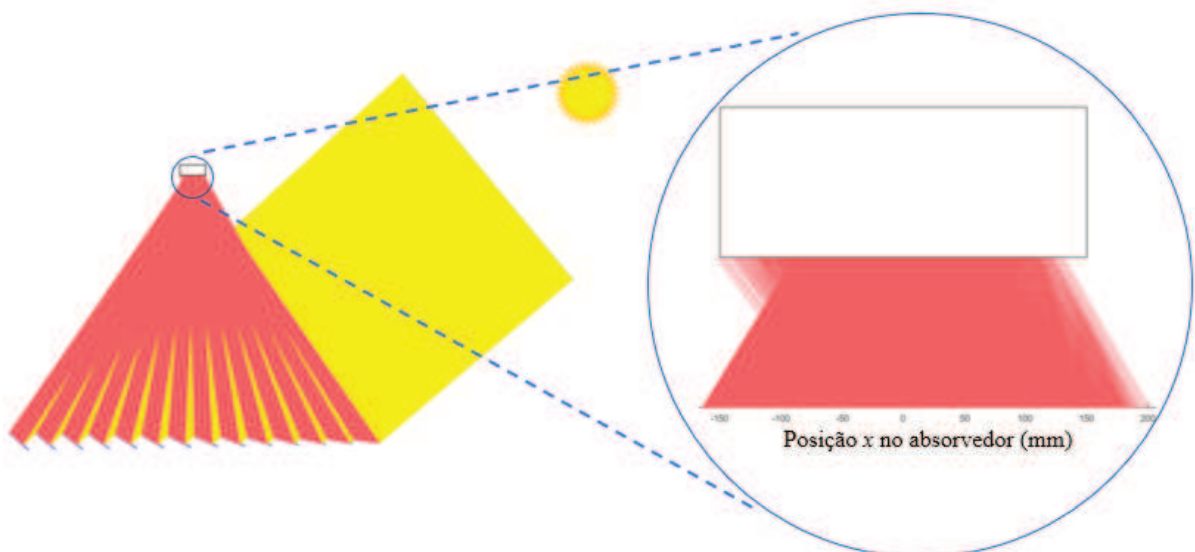


Figura 4.5 - Simulação com destaque para a região de entrada do absorvedor.

Na Figura 4.5 é possível observar a intersecção dos raios solares com o plano de entrada do absorvedor. A irradiância refletida no plano de entrada do absorvedor pode ser visualizada na Figura 4.6.

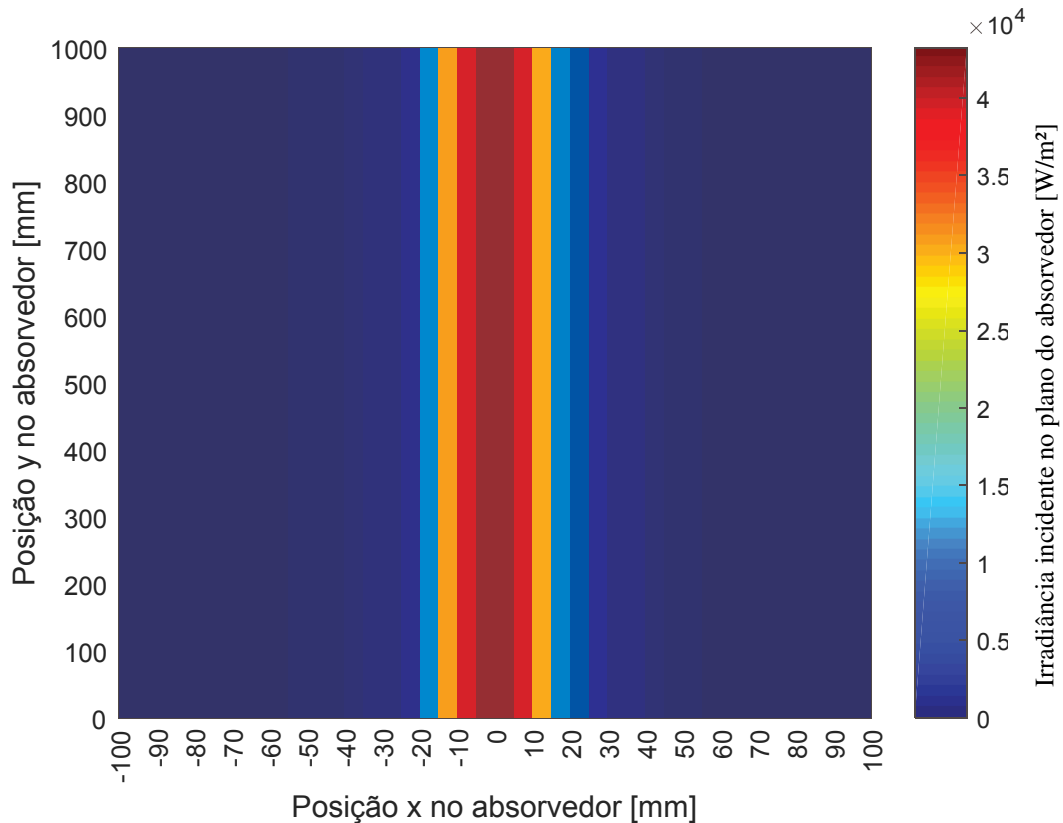


Figura 4.6 - Distribuição da irradiância no plano de entrada do absorvedor.

Na Figura 4.6, o plano de entrada do absorvedor está subdividido em faixas de 5 mm de largura. Cada uma destas faixas possui uma cor, definindo a irradiância incidente na faixa, com valor definido conforme escala de cores à direita do gráfico. Pode ser observado que a faixa central de 10 mm, compreendida entre a posição -5 mm e +5 mm no absorvedor, apresenta a maior irradiância, com valor de aproximadamente 43 kW/m². Em direção as bordas do absorvedor, a irradiância diminui até chegar ao valor zero.

4.4 O CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE NO PLANO DO ABSORVEDOR

A partir da simulação em vários horários do dia com intervalos iguais (dt), se obtém a potência solar disponível e a potência refletida, para cada um destes horários. Com isso, é possível realizar somatória desses valores obtendo a energia solar disponível e a energia

refletida ao absorvedor. Na Figura 4.7 é apresentado o resultado da compilação de 180 simulações ao longo de um dia, com intervalo entre simulações de aproximadamente 4 min.

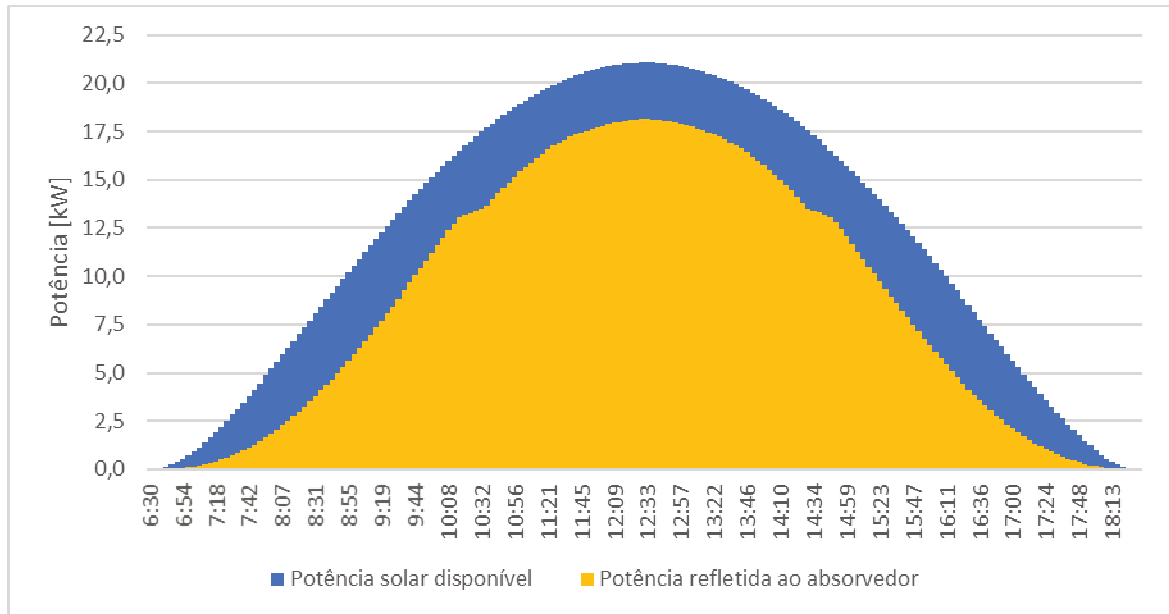


Figura 4.7 - Potência solar disponível e potência refletida ao absorvedor.

No exemplo da Figura 4.7, a integral da potência solar disponível resulta em 145,1 kWh e a integral da potência refletida ao absorvedor resulta em 106,7 kWh. A eficiência geométrica para este caso é de 73,5%.

4.5 VALIDAÇÃO DO CÓDIGO EM MATLAB

O código desenvolvido em MATLAB foi validado por meio da comparação dos seus resultados com os apresentados pelo software SolTrace. O refletor simulado para a comparação dos programas apresenta as seguintes características.

- Quantidade de espelhos: 14
- Espaçamento entre espelhos: 10 mm
- Largura dos espelhos: 300 mm
- Largura do absorvedor: 300 mm
- Comprimento do absorvedor e espelhos: 6000 mm
- Altura do absorvedor em relação ao plano dos espelhos: 3000 mm
- Raio de curvatura dos espelhos: 6778 mm
- Irradiância solar direta (DNI): 1000 W/m²

O perfil de radiação solar para implementado em ambos os programas foi de acordo com o modelo de BUIE (2004), para um CSR de 10%, conforme pode ser observado na Figura 4.8.

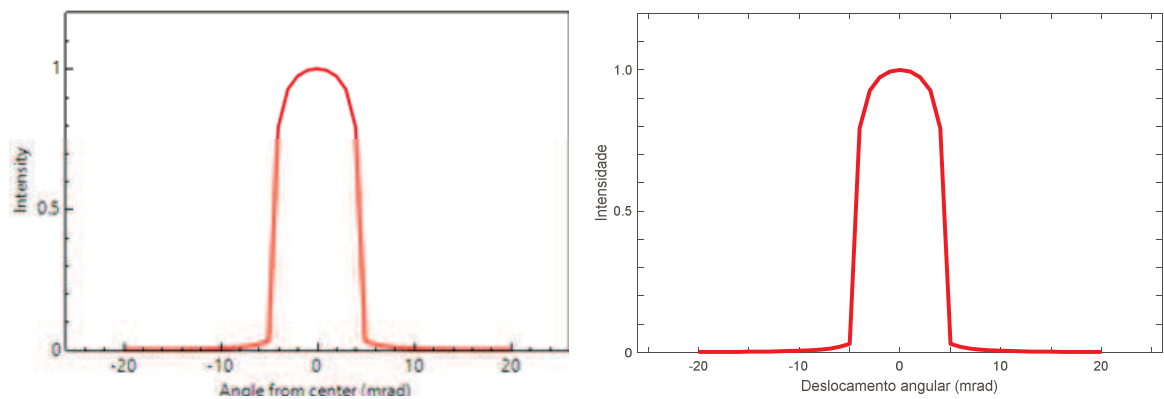


Figura 4.8 - Perfil de radiação solar no SolTrace (esquerda) e MATLAB (direita) para um CSR de 10%.

Na Figura 4.9 é apresentado o resultado do traçado de raios pelo Software SolTrace e pelo código desenvolvido em MATLAB.

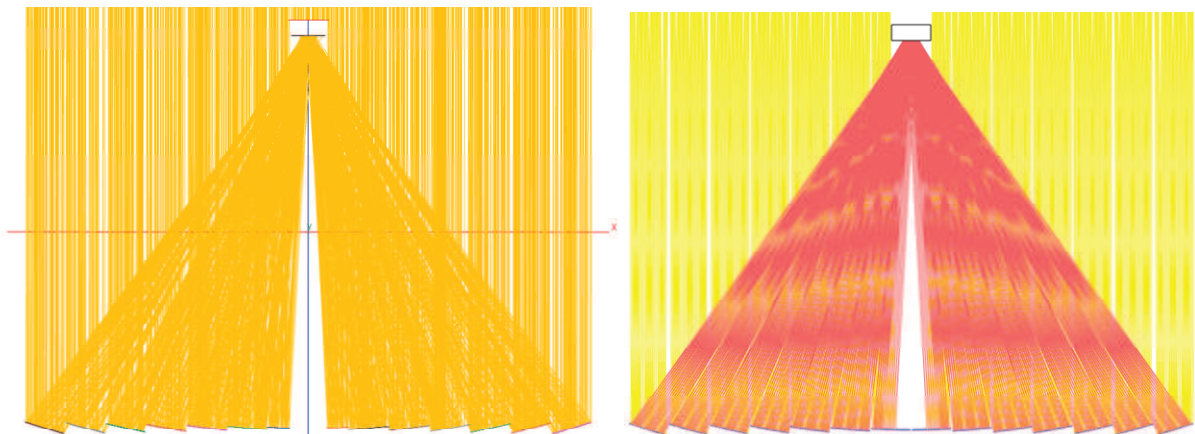


Figura 4.9 - Traçado de raios pelo Software SolTrace (esquerda) e código desenvolvido em MARLAB (direita).

A potência incidente no plano do absorvedor também foi simulada, utilizando o SolTrace e o código desenvolvido em Matlab. As simulações foram executadas da mesma forma que BITTENCOURT et al. (2015), variando a posição solar primeiramente somente no sentido transversal (Leste-Oeste) e após somente no sentido longitudinal (Norte-Sul). A

quantidade de raios foi de 10^5 raios para ambos os programas. Os resultados da simulação para a variação solar no sentido transversal pode ser observado na Figura 4.10 e para a variação solar no sentido longitudinal pode ser observado na Figura 4.11.

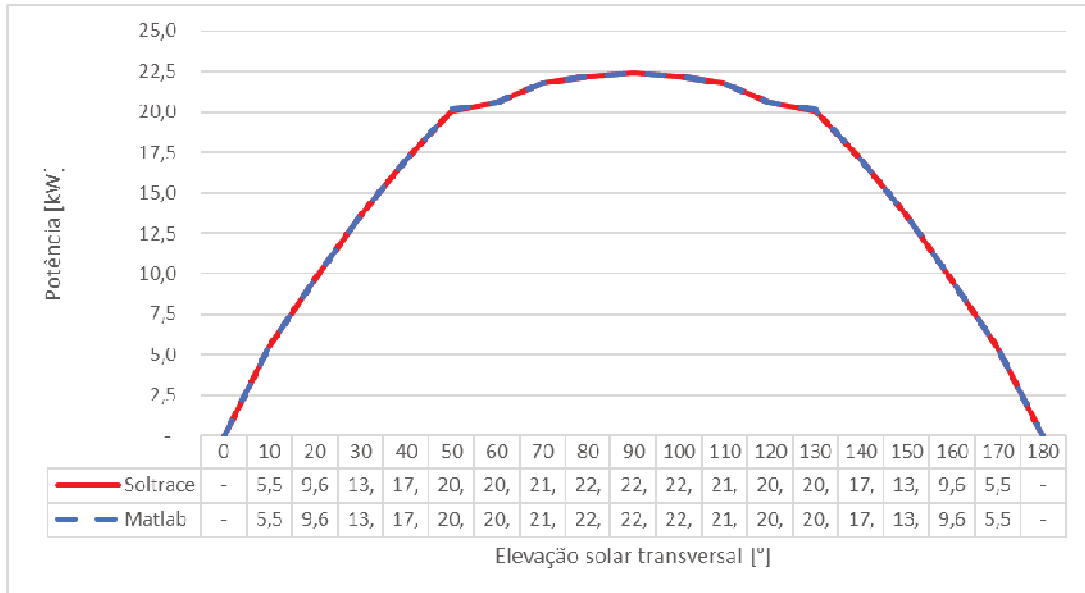


Figura 4.10 - Potência incidente no plano de entrada do absorvedor em função da elevação solar transversal.

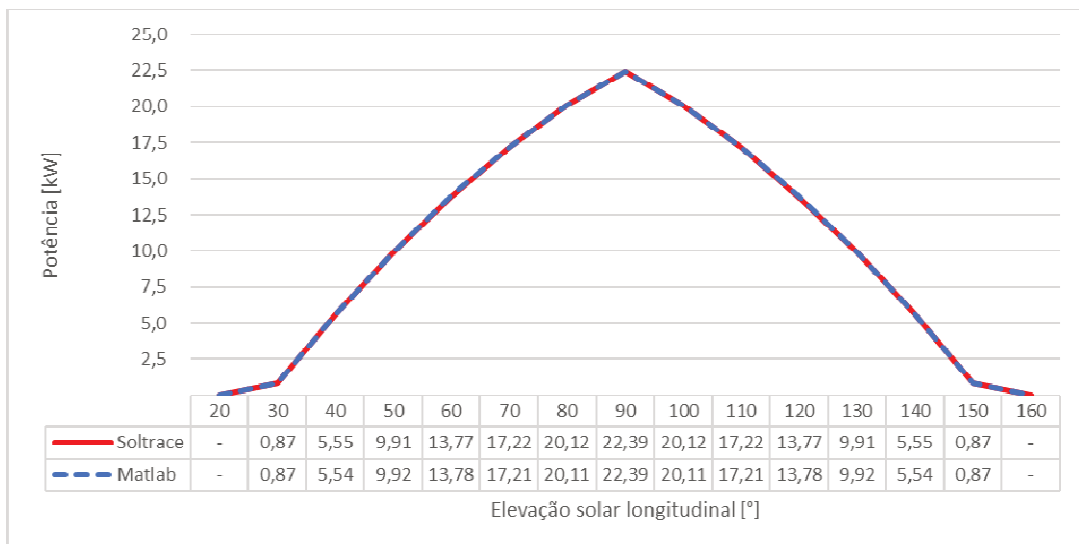


Figura 4.11 - Potência incidente no plano de entrada do absorvedor em função da elevação solar longitudinal.

Pela análise dos gráficos na Figura 4.10 e na Figura 4.11 é possível observar que ambos programas apresentam resultados muito próximos.

Como o tempo computacional para realizar as simulações está diretamente relacionado ao número de raios, foi realizado uma análise de sensibilidade do número de raios utilizados nos resultados das simulações. Foi simulado no SolTrace e no MATLAB a potência refletida no plano de entrada do absorvedor, variando-se a quantidade de raios, conforme pode ser visualizado na Figura 4.12.

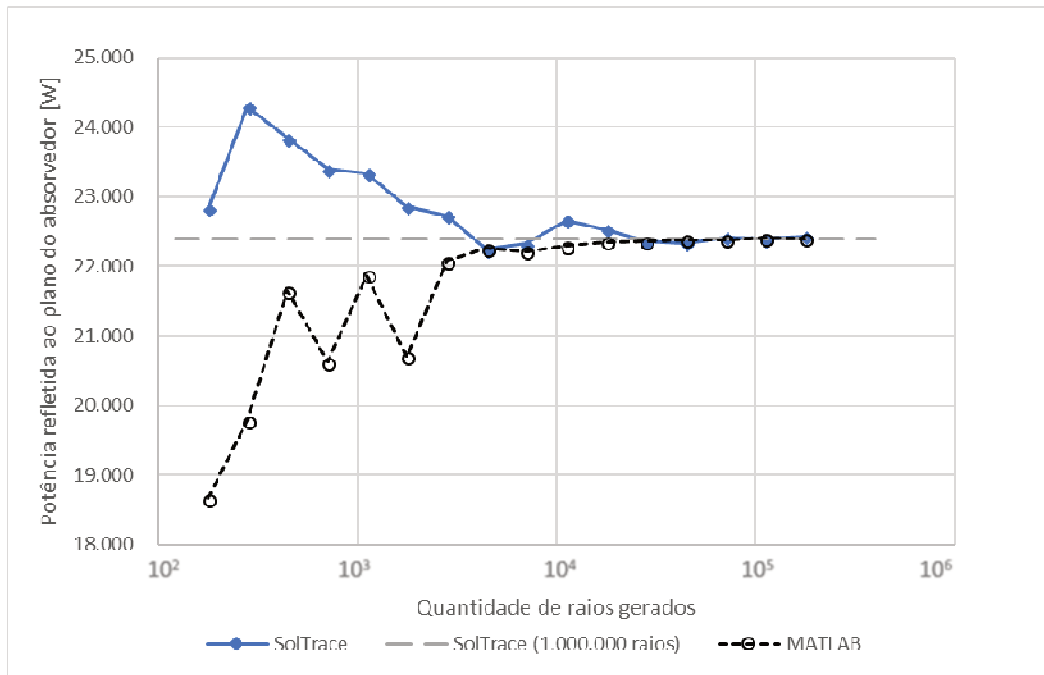


Figura 4.12 - Sensibilidade do número de raios utilizados nos resultados das simulações.

A referência utilizada foi a simulação em SolTrace para 10^6 raios. Ambos os programas se aproximaram da referência a partir de 4.000 raios. No programa desenvolvido, com 4.000 raios, os resultados apresentaram uma diferença de 0,61% em relação à referência. Com 70.000 raios, a diferença para a referência foi de apenas 0,02%. Esta diferença foi considerada adequada para as simulações subsequentes e, como consequência, todas as simulações no MATLAB foram realizadas com 70.000 raios.

4.6 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO CÓDIGO DESENVOLVIDO EM MATLAB RELAÇÃO AO SOLTRACE

Durante a realização deste trabalho, foi possível observar vantagens e desvantagens do código desenvolvido em MATLAB, em relação ao SolTrace. Na Tabela 4.1 são apresentadas as vantagens e desvantagens de cada um.

Tabela 4.1 - Comparação entre MATLAB e SolTrace.

MATLAB	SolTrace
<p>Vantagens:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Flexibilidade do código. - Cálculo dos ângulos de zênite, azimute e inclinação dos espelhos no próprio código. - Cálculo da potência instantânea e energia incidente no plano de entrada do absorvedor ao longo de um período. 	<p>Vantagens</p> <ul style="list-style-type: none"> - Visualização do traçado de raios em três dimensões. - Não necessita investir tempo no desenvolvimento.
<p>Desvantagens:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Visualização do traçado de raios em apenas duas dimensões. - Alta complexidade para realizar qualquer modificação. 	<p>Desvantagens</p> <ul style="list-style-type: none"> - Não calcula ângulos de zênite, azimute e inclinação dos espelhos. - Não calcula a energia incidente no plano de entrada do absorvedor.

5 SIMULAÇÃO DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO LFR

Durante as simulações, foram avaliadas diversas configurações do LFR, conforme serão mostradas nos subcapítulos subsequentes. O único parâmetro que foi mantido constante durante todas as simulações, foi a abertura do refletor Fresnel (*apert*), que foi mantida em 4330 mm. Desta forma, à medida que foram variados a quantidade de espelhos, a largura de cada espelho (*Le*) variou, de modo a manter fixa a abertura.

É importante ressaltar que as perdas de final de linha não foram contabilizadas nessa análise, pois seu valor está intimamente ligado ao comprimento do campo de espelhos e do absorvedor. No caso estudado, que considera um refletor Fresnel linear com comprimento dos espelhos de 6 m (espelhos e absorvedor), as perdas por final de linha seriam extremamente grandes em determinados momentos, em que a elevação solar longitudinal fosse muito maior ou muito menor do que 90° . Assim, a avaliação das demais perdas poderia ficar comprometida. Então, ao calcular o movimento aparente do Sol, somente foi considerado a variação da elevação solar transversal (α_T), mantendo a elevação solar longitudinal fixa ($\alpha_L=90^\circ$).

Para avaliar a influência dos parâmetros construtivos do LFR no seu desempenho, foi definido como base para os valores da irradiância o equinócio de primavera, dia 20/março. Para calcular a energia diária, a potência foi integrada em intervalos de aproximadamente 4 min ao longo do dia. Na Figura 5.1 pode ser observada a variação da irradiância ao longo dos equinócios de outono e primavera, dias 20/março e 22/setembro, respectivamente, e nos solstícios de inverno e verão, dias de 21/junho e 21/dezembro, respectivamente, com base no modelo de ESRA.

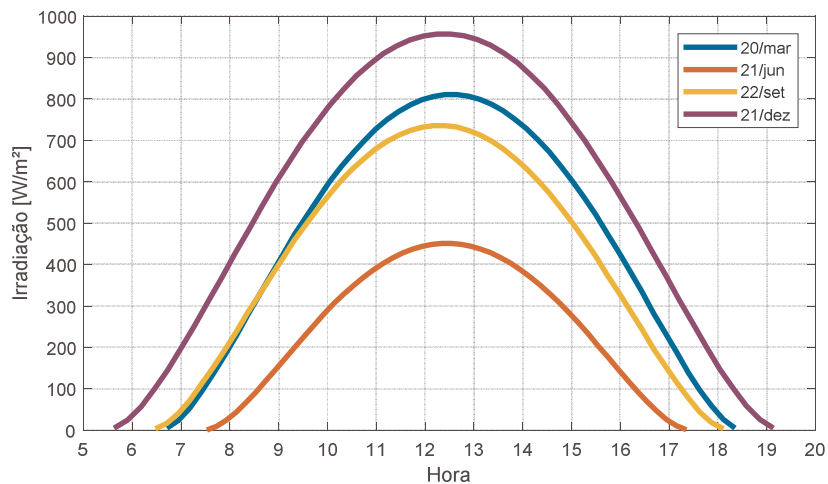


Figura 5.1 - Potência incidente no plano de abertura do LFR para os solstícios e equinócios, conforme o modelo de céu claro de ESRA.

5.1 AVALIAÇÃO DO ESPAÇAMENTO ENTRE ESPELHOS

Para a avaliação do efeito do espaçamento entre os espelhos no desempenho LFR, foi simulado o caso com 14 espelhos com raios de curvatura de 6.250 mm (equivalente a uma flecha de 1,8 mm no centro de cada espelho), mantendo o absorvedor a uma altura de 3 m em relação ao plano do eixo dos espelhos. Também foi mantida fixa a abertura dos espelhos em 4.330 mm e foi variado a largura dos espelhos em função do espaçamento entre espelhos. Na Tabela 5.1 podem ser visualizados os parâmetros utilizados para a simulação.

Tabela 5.1 - Dados de entrada para análise da variação do espaçamento entre espelhos.

Espaçamento entre espelhos [mm]	Quantidade de espelhos	Largura dos espelhos [mm]	Raio de curvatura dos espelhos [mm]	Abertura dos espelhos [mm]	Largura do absorvedor [mm]
0	14	309,3	6250	4330	300
10	14	300,0	6250	4330	300
20	14	290,7	6250	4330	300
30	14	281,4	6250	4330	300
40	14	272,1	6250	4330	300

Na Figura 5.2 é apresentado o resultado da simulação da variação do espaçamento entre espelhos na eficiência do LFR.

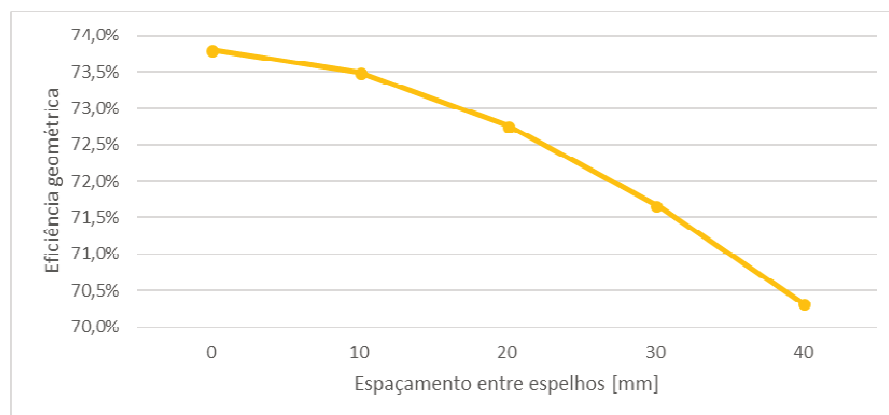


Figura 5.2 - Variação da eficiência do LFR em função do espaçamento entre espelhos.

Pode-se notar que ocorre uma diminuição da eficiência com o aumento do espaçamento entre espelhos. A razão desta diminuição pôde ser determinada analisando as perdas, conforme é apresentado na Figura 5.3.

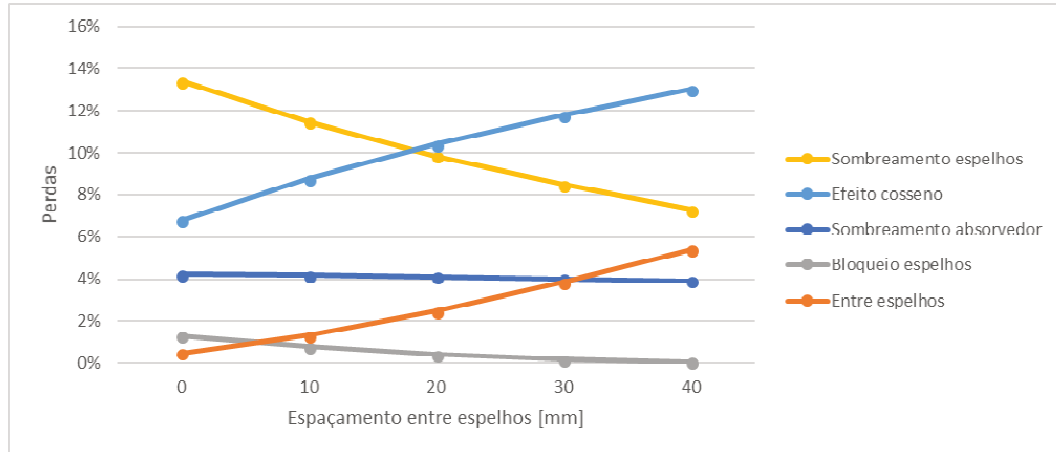


Figura 5.3 - Perdas do LFR em função da variação do espaçamento entre espelhos.

Observando-se a Figura 5.3, pode-se notar que as perdas por efeito cosseno aumentam com o aumento do espaçamento entre espelhos. Isso ocorre porque aumentando o espaçamento entre espelhos, reduz-se a largura dos espelhos. Assim, mantendo a área de abertura do LFR fixa, faz com que os eixos dos espelhos fiquem mais externos, forçando-os a inclinarem mais para refletir a radiação, aumentando as perdas por efeito cosseno. Porém, o aumento das perdas por efeito cosseno são compensadas pela redução nas perdas por sombreamento dos espelhos, que diminuem, já que com os espelhos mais afastados, há menor sombreamento. Já a perda que apresenta um maior aumento é a perda de radiação entre os espelhos, que era próximo de 0,2% com espaçamento de 0 mm e passou a representar aproximadamente 5,2% para espaçamento de 40 mm.

É possível concluir que quanto menor o espaçamento entre os espelhos, menores serão as perdas totais. Porém não é possível construir um LFR sem espaçamento entre os espelhos, uma vez que eles se movimentam e poderiam ocorrer interferência entre eles. Desta forma, para as demais etapas de simulação que serão apresentadas nesta dissertação, o espaçamento entre os espelhos será mantido fixo em 10 mm.

5.2 CRITÉRIO PARA DEFINIÇÃO DA LARGURA DO ABSORVEDOR

A largura do absorvedor possui influência nas perdas por sombreamento sobre o campo de espelhos. Quanto maior a largura do absorvedor (L_a), maiores serão estas perdas. A definição da largura do absorvedor teve início pela análise da distribuição da energia refletida pelos espelhos no plano de entrada do absorvedor. Na Figura 5.4 é apresentada a distribuição

para o dia 20 de março, utilizando um refletor Fresnel linear com 14 espelhos com raio de curvatura do 8.000 mm, espaçamento entre espelhos de 10 mm, altura do absorvedor de 3.000 mm.

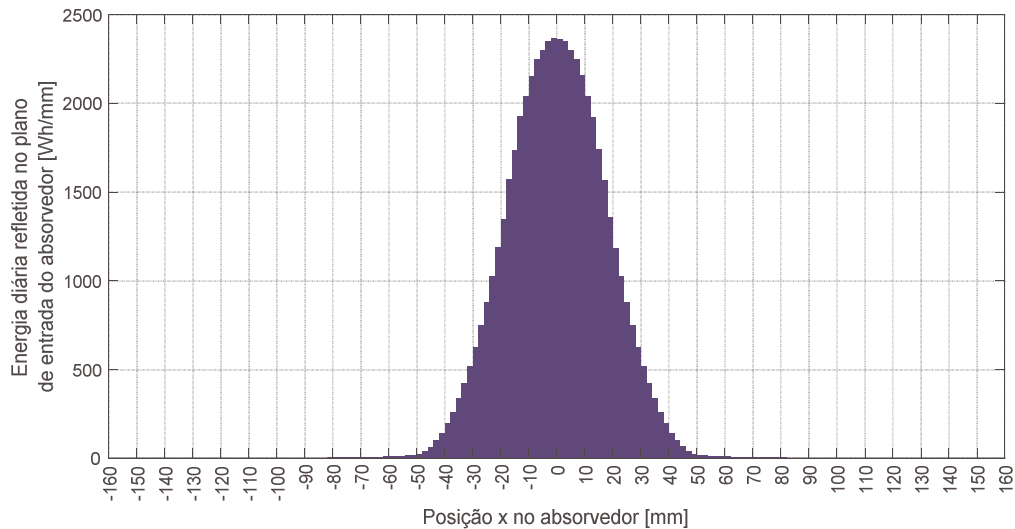


Figura 5.4 - Energia diária refletida no plano de entrada do absorvedor.

Observa-se na Figura 5.4 que a maior parte da energia incidente no plano de entrada do absorvedor se encontra em uma região com 120 mm de largura (entre -60 mm e 60 mm) no plano de entrada do absorvedor. Porém há níveis de energia que atingem o absorvedor em posições mais externas. Isto foi quantificado percentualmente, conforme apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Percentual da energia interceptada pelo absorvedor em função de sua largura.

Percentual de energia interceptada pelo absorvedor	Região no plano de entrada do absorvedor	Dispersão da energia no plano de entrada do absorvedor
99,00%	-43,0 mm e 43,0 mm	86 mm
99,90%	-66,3 mm e 66,3 mm	132,6 mm
99,99%	-86,5 mm e 86,5 mm	173,0 mm
100,00%	-141,7 mm e 141,7 mm	283,4 mm

Conforme a Tabela 5.2, para interceptar toda a energia refletida pelos espelhos, é necessário um absorvedor com largura de 283,4 mm. Porém com um absorvedor de 132,6 mm, é possível interceptar 99,90% da radiação. Ou seja, com uma perda de 0,1% da radiação, é possível reduzir a largura do absorvedor em 53,2% (de 283,4 mm para 132,6 mm).

Além da análise utilizando espelhos com raio de curvatura de 6.250 mm, foi realizado também uma análise, variando o raio de curvatura dos espelhos entre 6.000 mm e 10.000 mm, como pode ser observado na Figura 5.5.

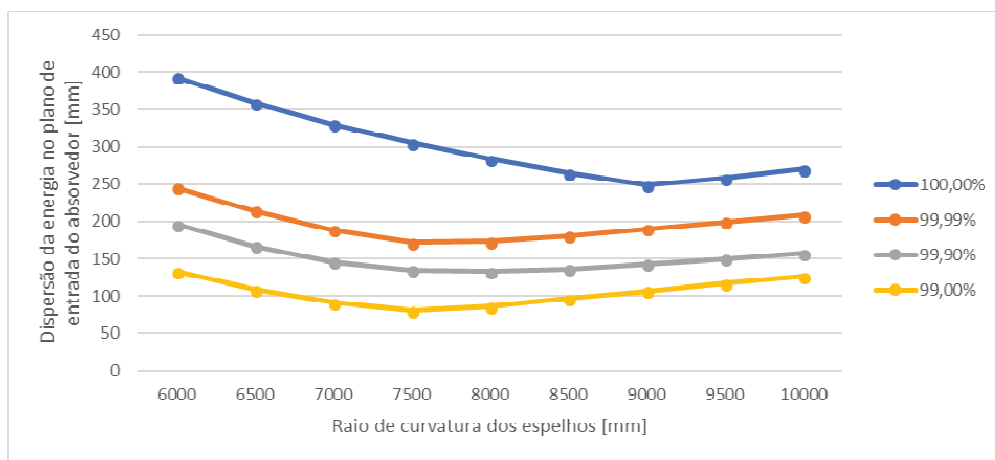


Figura 5.5 - Dispersão da energia no plano de entrada do absorvedor.

Para esta simulação, a dispersão de energia também variou consideravelmente em função do percentual de interceptação da energia refletida pelos espelhos. A diferença é que nesta simulação, é possível obter os valores do raio de curvatura que minimizam a largura do absorvedor para vários percentuais de interceptação da energia refletida pelos espelhos. Assumindo a perda 0,1% da radiação refletida pelos espelhos (de 100% para 99,9%), é possível reduzir a largura do absorvedor de 248,4 mm para 115,8 mm, que equivale a uma redução de 46,6% na largura do absorvedor. Como será visto nos próximos subcapítulos, a redução da largura do observador é importante para reduzir as perdas por sombreamento do absorvedor sobre o campo de espelhos. Neste trabalho, optou-se por considerar a largura do absorvedor aquela que intercepte 99,90% da radiação refletida pelos espelhos.

5.3 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO RAIO DE CURVATURA DOS ESPELHOS CILINDRICOS NA LARGURA DO ABSORVEDOR

Com base no critério adotado neste trabalho, de que a largura do absorvedor seja aquela que intercepta 99,9% da radiação refletida pelos espelhos, foram realizadas várias simulações utilizando o LFR com espelhos cilíndricos. As variáveis utilizadas foram o raio de curvatura dos espelhos, a quantidade de espelhos, a largura dos espelhos e a altura do absorvedor. Os resultados destas simulações estão representados graficamente a partir da Figura 5.6 até a Figura 5.12, sendo cada figura com uma altura de absorvedor diferente.

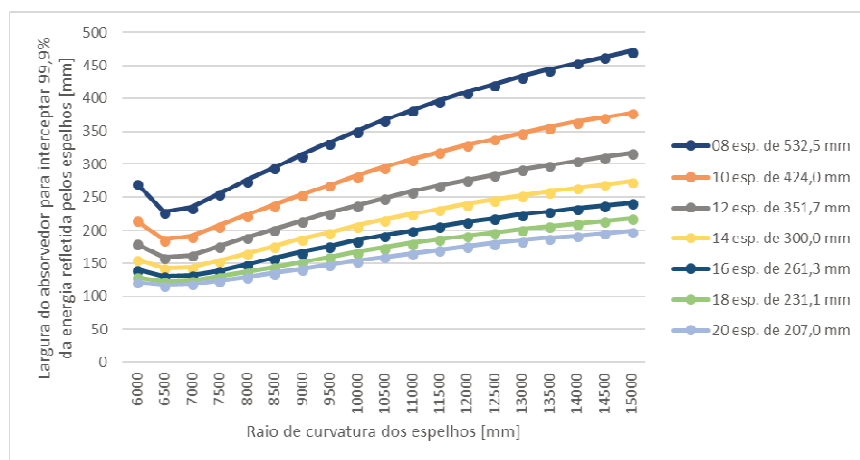


Figura 5.6 - Larguras do absorvedor para altura de 2000 mm.

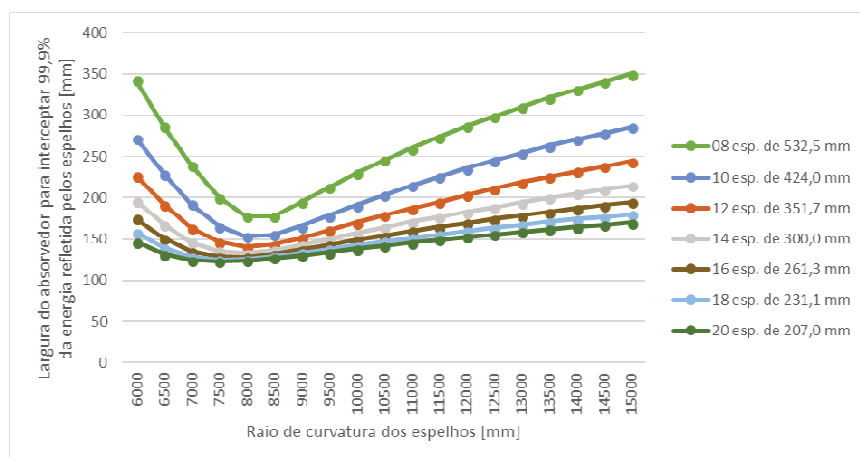


Figura 5.7 - Larguras do absorvedor para altura de 3000 mm.

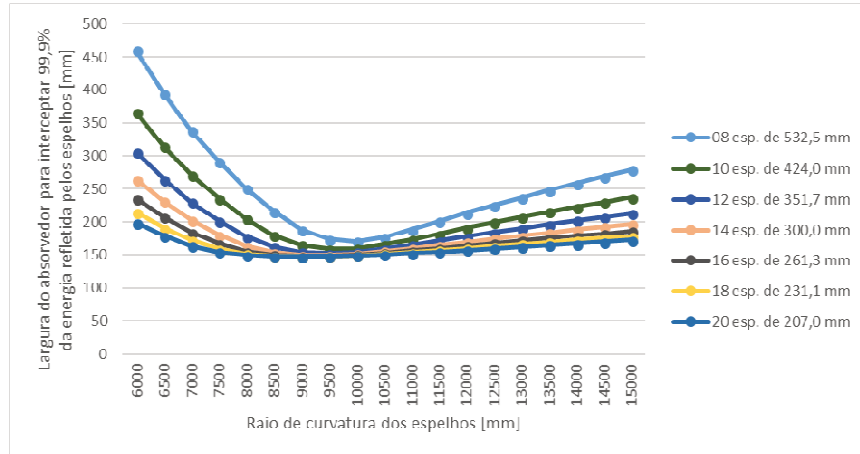


Figura 5.8 - Larguras do absorvedor para altura de 4000 mm.

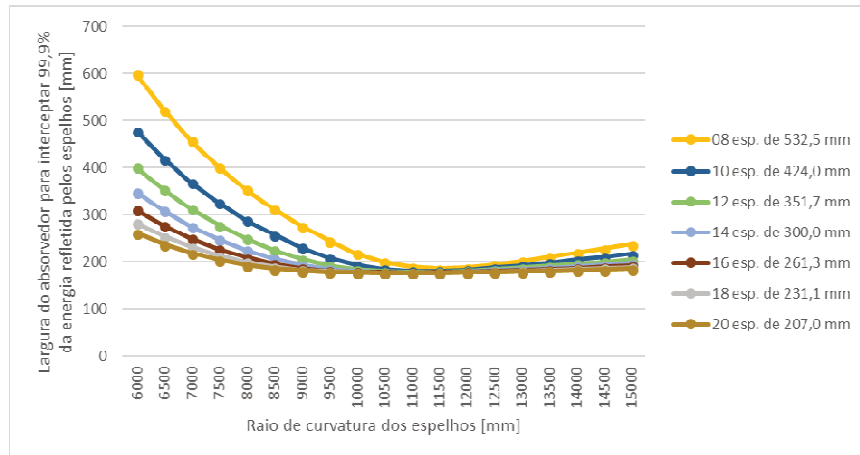


Figura 5.9 - Larguras do absorvedor para altura de 5000 mm.

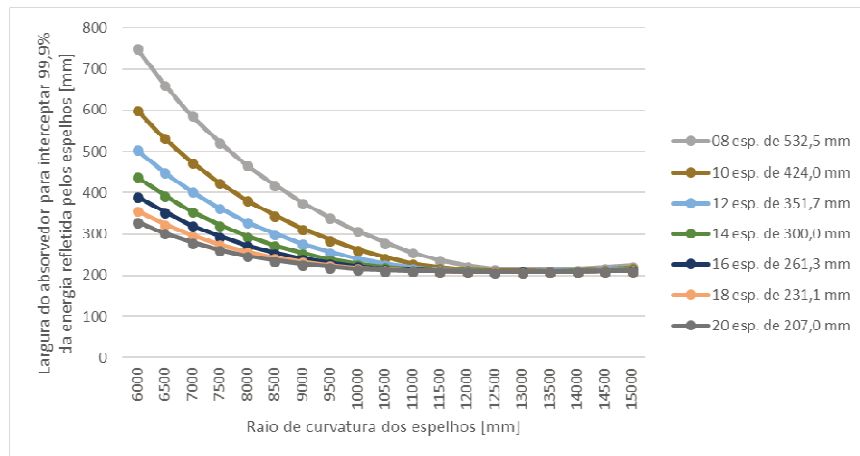


Figura 5.10 - Larguras do absorvedor para altura de 6000 mm.

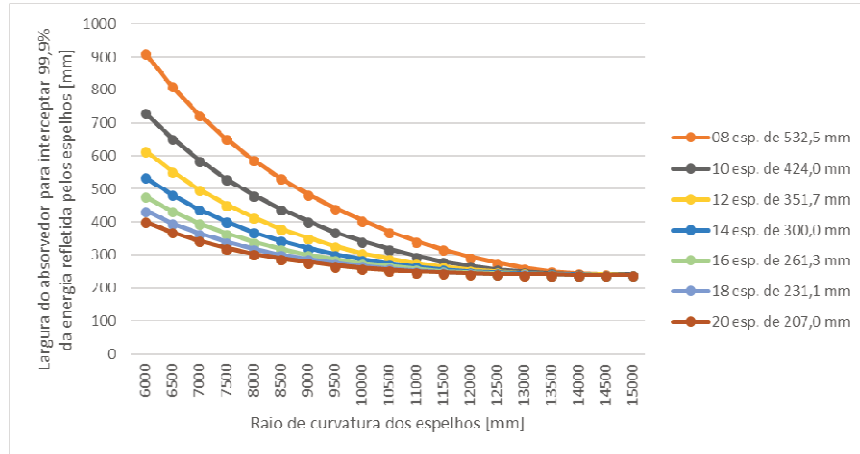


Figura 5.11 - Larguras do absorvedor para altura de 7000 mm.

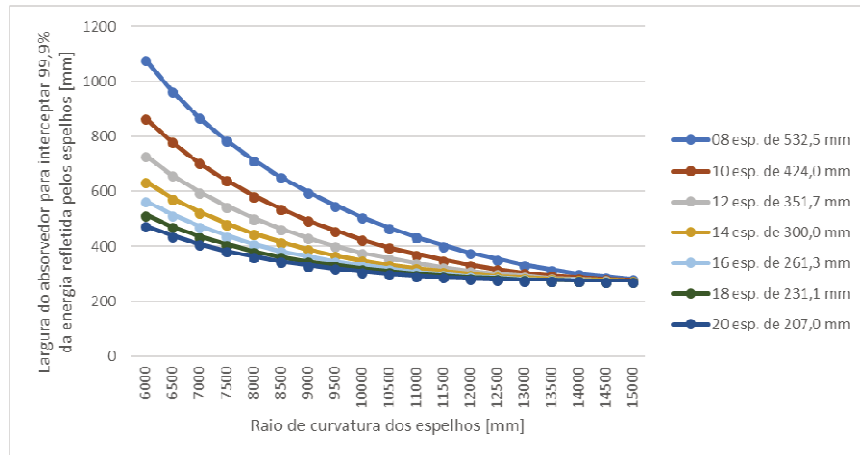


Figura 5.12 - Larguras do absorvedor para altura de 8000 mm.

A partir da análise destas figuras, é possível observar que, para cada combinação de altura de absorvedor e largura do espelho, existe um raio de curvatura que minimiza a largura do absorvedor. Estas larguras mínimas para cada combinação mencionada, podem ser visualizadas na Figura 5.13.

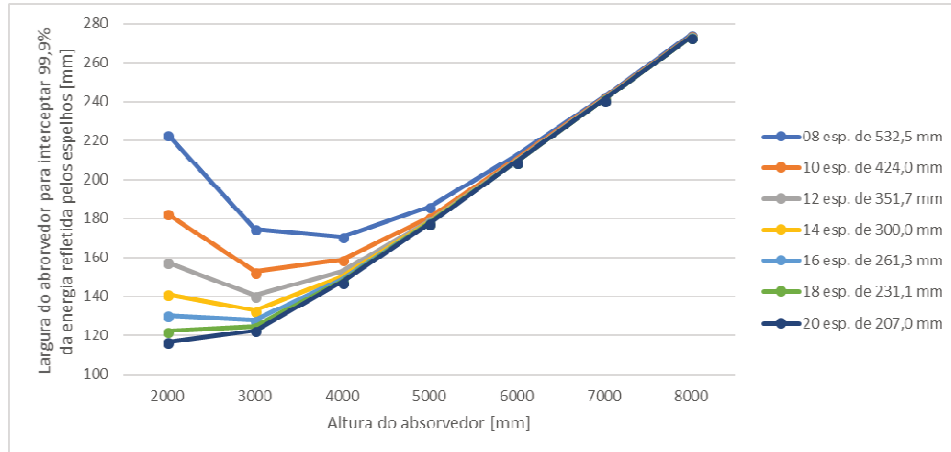


Figura 5.13 - Largura mínima do absorvedor para o LFR com espelhos cilíndricos, em função da altura do absorvedor.

É possível concluir que para alturas do absorvedor entre 2.000 mm e 5.000 mm, a definição da largura do absorvedor depende da altura do absorvedor e da quantidade de espelhos. Já para alturas do absorvedor acima de 6.000 mm, a largura do absorvedor depende exclusivamente da altura do absorvedor, não tendo relação com a quantidade de espelhos. Os valores dos raios de curvatura que minimizam a largura de absorvedor e as respectivas larguras de absorvedor mínimas, foram inseridos na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Raios de curvatura dos espelhos para minimizar a largura do absorvedor.

Quantidade de espelhos		8	10	12	14	16	18	20	
Largura dos espelhos [mm]		532,5	424,0	351,7	300,0	261,3	231,1	207,0	
Altura absorvedor [mm]	2000	Larg. Abs. [mm]	223,2	182,6	157,6	141,2	130,2	122,4	116,6
		Raio esp. [mm]	6600	6600	6600	6800	6600	6600	6600
	3000	Larg. Abs. [mm]	174,8	152,8	140,4	132,8	127,8	124,6	122,6
		Raio esp. [mm]	8200	8200	8000	7900	7800	7600	7500
	4000	Larg. Abs. [mm]	170,8	158,8	152,8	150	148,6	147,8	147,4
		Raio esp. [mm]	9800	9700	9400	9300	9100	9000	9000
	5000	Larg. Abs. [mm]	186,2	180,8	179	178,2	178	177,8	177,6
		Raio esp. [mm]	11600	11200	11100	11000	10900	11000	11000
	6000	Larg. Abs. [mm]	212,2	210,4	209,8	209,4	209,2	209	209
		Raio esp. [mm]	13200	13100	12900	12900	13000	12600	12700
	7000	Larg. Abs. [mm]	242,4	241,8	241,4	241,2	241	241	240,8
		Raio esp. [mm]	15000	14800	14900	14800	14600	14700	14300
	8000	Larg. Abs. [mm]	274,4	273,8	273,4	273,4	273,4	273,2	273,2
		Raio esp. [mm]	16900	16800	16800	16800	16900	17000	17100

Em outra análise realizada, foram plotados na Figura 5.14 os raios de curvatura que minimizavam a largura do absorvedor, para alturas de absorvedor diferentes e larguras e quantidades de espelhos diferentes.

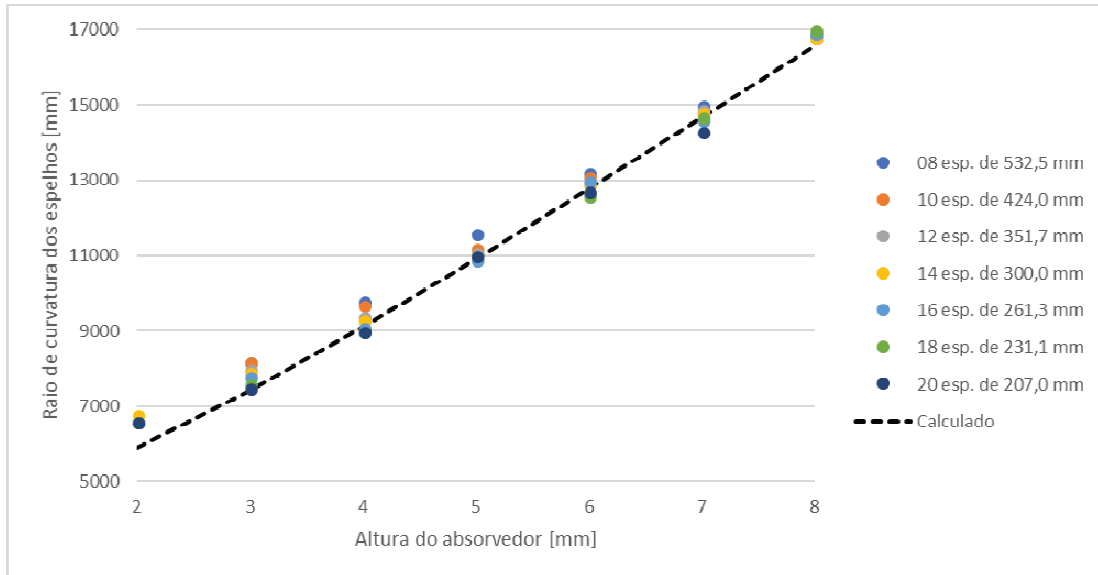


Figura 5.14 - Raio de curvatura dos espelhos cilíndricos que minimizam a largura do absorvedor para diferentes alturas de absorvedor e quantidade de espelhos.

Pela observação da Figura 5.14, pode-se concluir que o raio de curvatura que minimiza a largura do absorvedor está diretamente relacionado com a abertura do LFR e a altura do absorvedor. Esse comportamento pode ser descrito pela Equação (5.1).

$$Re = 2\sqrt{\left(\frac{apert}{2}\right)^2 + h_c^2} \quad (5.1)$$

onde *apert* é a abertura do LFR e h_c é a altura do absorvedor

Na Figura 5.14, a linha pontilhada representa o raio de curvatura dos espelhos calculado pela Equação (5.1). Dessa forma, pode-se concluir que a utilização da Equação (5.1) fornece valores de raio de curvatura dos espelhos muito próximos àqueles obtidos por simulações.

Os dados de raio de curvatura e largura de absorvedor da Tabela 5.3 serão utilizados nas etapas de simulação de eficiência geométrica e perdas nos LFR com espelhos cilíndricos. Além disso, apenas para critério de calcular o sombreamento causado pelo absorvedor sobre o campo de espelhos, foi considerada a largura do absorvedor, acrescido de um valor de 10 mm, representando a largura total em função do uso de isolamento externo à parede interna do absorvedor.

5.4 AVALIAÇÃO DA LARGURA DO ABSORVEDOR PARA ESPELHOS PLANOS

Ainda com base no mesmo critério adotado, de que a largura do absorvedor seja aquela que intercepta 99,9% da radiação refletida pelos espelhos, foram realizadas simulações utilizando espelhos planos. As variáveis, neste caso, foram a quantidade de espelhos, a largura dos espelhos e a altura do absorvedor. Os resultados destas simulações estão representados graficamente na Figura 5.15.

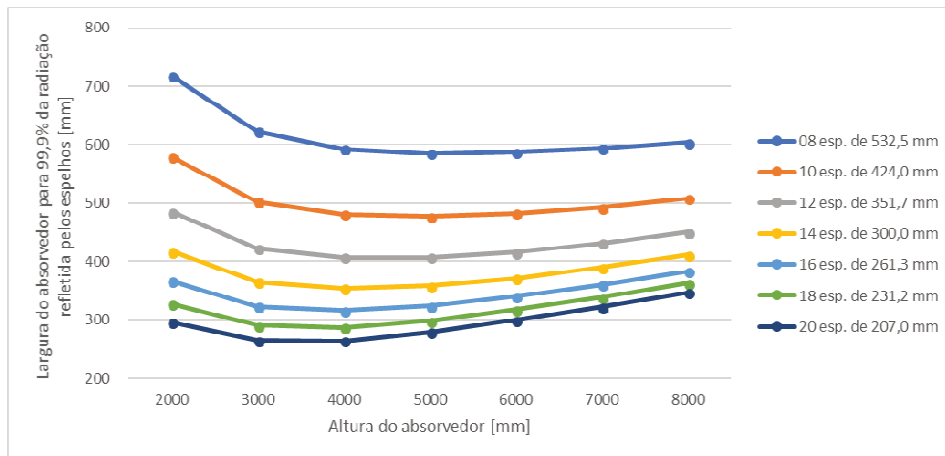


Figura 5.15 - Largura de absorvedor para espelhos planos e várias alturas de absorvedor.

Fica evidente, a partir da análise da Figura 5.15, que a medida que a largura dos espelhos diminui, também diminui a largura do absorvedor, sendo que a largura do absorvedor é sempre maior que a largura dos espelhos do LFR. Também, quando comparado com a Figura 5.13, a largura de absorvedor mínima para LFR com espelhos planos é muito superior à largura necessária quando são utilizados espelhos cilíndricos. Na Tabela 5.4 são apresentadas as medidas de larguras de absorvedor mínimas para LFR com espelhos planos.

Tabela 5.4 - Largura de absorvedor mínimas para LFR com espelhos planos.

Quantidade de espelhos	8	10	12	14	16	18	20
Largura dos espelhos [mm]	532,5	424,0	351,7	300,0	261,3	231,1	207,0
Altura absorvedor [mm]	Largura do absorvedor [mm]						
2000	717,6	579,4	485,2	417,4	366,8	328,0	296,2
3000	622,8	502,4	422,4	365,6	323,4	290,8	265,0
4000	592,8	481,0	407,2	354,6	316,6	287,0	264,2
5000	585,2	477,8	407,4	358,6	323,6	298,4	279,4
6000	587,6	483,0	415,8	371,6	340,8	317,8	300,0
7000	594,0	493,0	431,6	390,6	361,2	339,4	322,6
8000	603,8	508,6	450,8	411,6	383,6	362,8	347,0

As larguras mínimas de absorvedor para LFR com espelhos planos, apresentados na Tabela 5.4, serão utilizados nas etapas de simulação de eficiência geométrica e perdas nos LFR com espelhos planos. Da mesma forma que para espelhos cilíndricos, para o cálculo do sombreamento causado pelo absorvedor sobre o campo de espelhos, foi considerado a largura do absorvedor, acrescido de um valor de 10 mm, representando a largura total em função do uso de isolamento externo à parede interna do absorvedor.

Além disso, foi avaliado a largura de absorvedor mínima possível com a utilização de espelhos planos. Foi simulado, com o código desenvolvido em MATLAB, a utilização de espelhos planos com larguras variadas. Na Figura 5.16 é apresentado o resultado desta simulação, juntamente com os resultados obtidos pela Equação (3.9), proposta por CHAVES (2016), que utiliza espelhos de largura infinitesimal. A largura de absorvedor obtida com a utilização de espelhos de largura infinitesimal representa a largura mínima possível para LFR com espelhos planos.

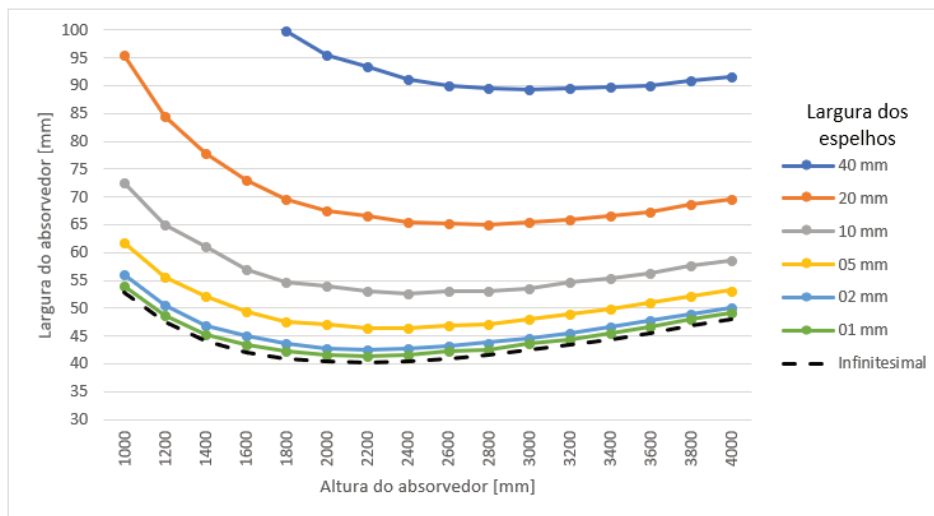


Figura 5.16 - Compara resultados do código em MATLAB com equação proposta por CHAVES (2016).

Na Figura 5.16, as simulações utilizando o código desenvolvido em MATLAB são representadas pelas linhas sólidas, que iniciaram com espelhos planos de 40 mm e reduziram progressivamente até 1 mm de largura. A linha tracejada representa o resultado calculado pela Equação (3.9), proposta por CHAVES (2016). O resultado das simulações em MATLAB apontam que, à medida que é reduzida a largura dos espelhos, também se reduz a largura do absorvedor, se aproximando do resultado obtido por CHAVES (2016), que representa, para as condições analisadas, a largura do absorvedor mínima possível.

5.5 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA DISTÂNCIA FOCAL DOS ESPELHOS PARABÓLICOS NA LARGURA DO ABSORVEDOR

Os resultados obtidos para largura de absorvedor utilizando espelhos em formato parabólico não apresentaram diferenças em relação aos resultados obtidos com espelhos cilíndricos. Na Figura 5.17 é apresentada a largura de absorvedor mínima para diversas alturas de absorvedores e quantidades e larguras de espelhos diferentes, conforme legenda.

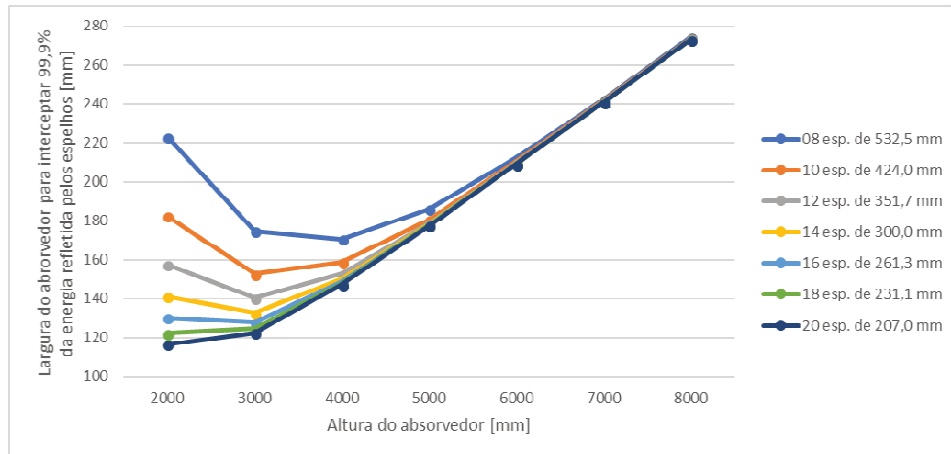


Figura 5.17 - Larguras de absorvedor mínimas para LFR com espelhos parabólicos.

Ao comparar a Figura 5.17 com a Figura 5.13, observa-se que os gráficos são praticamente idênticos.

Na Figura 5.18 é apresentado um gráfico com as distâncias focais dos espelhos parabólicos que minimizam a largura do absorvedor, para alturas de absorvedor, larguras e quantidades de espelhos diferentes. Nesse caso, em lugar do raio de curvatura são apresentadas as distâncias focais (df), pois é ela que define a geometria de um espelho parabólico.

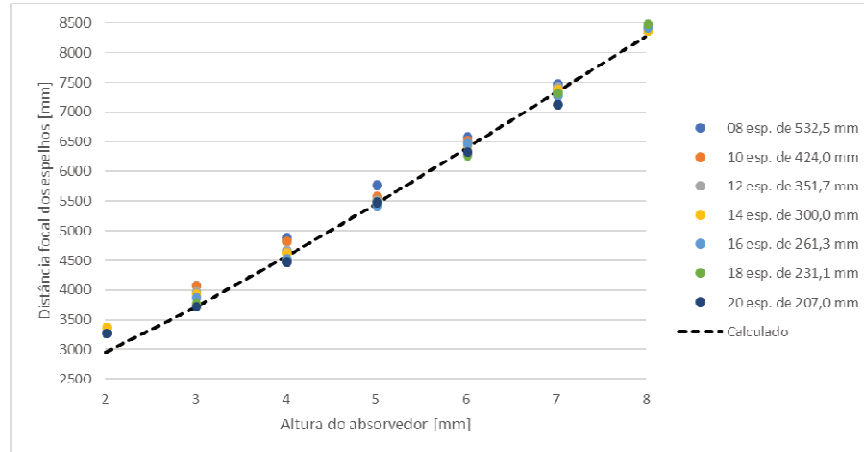


Figura 5.18 - Avaliação dos parâmetros do LFR e distância focal dos espelhos parabólicos que minimizam a largura do absorvedor.

Pela observação desta figura, concluiu-se que o raio de curvatura que minimiza a largura do absorvedor está diretamente relacionado com a abertura do LFR e a altura do absorvedor. A equação que representa essa característica é definida pela Equação (5.2), e é apresentada no gráfico pela linha pontilhada.

$$df = \sqrt{\left(\frac{apert}{2}\right)^2 + h_c^2} \quad (5.2)$$

Comparando-se a Figura 5.14 e a Figura 5.18, observa-se que há semelhança nos gráficos, sendo que a diferença está no eixo y onde, no primeiro gráfico, representa o raio de curvatura dos espelhos cilíndricos e, no segundo gráfico, representa a distância focal dos espelhos parabólicos. A partir das Equações (5.1) e (5.2) é possível encontrar uma relação, em que a distância focal (df) para espelhos parabólicos, equivale à metade do raio de curvatura dos espelhos cilíndricos. Esta relação está representada na Equação (5.3).

$$df = Re / 2 \quad (5.3)$$

A Equação (5.3) está de acordo com o que foi apresentado no subcapítulo 3.7.2, no que se refere a que, quando a abertura do espelho for pequena (ângulo de borda, ψ_{rim} , pequeno), o espelho cilíndrico apresenta um comportamento muito próximo ao espelho parabólico. O maior ângulo de borda dentre os espelhos analisados é de $4,62^\circ$, equivalente ao espelho

cilíndrico com raio de 6600 mm e largura de 532,5 mm. Na Figura 5.19 é apresentado o perfil da curvatura cilíndrica e parabólica, para um ângulo de borda de $4,62^\circ$.

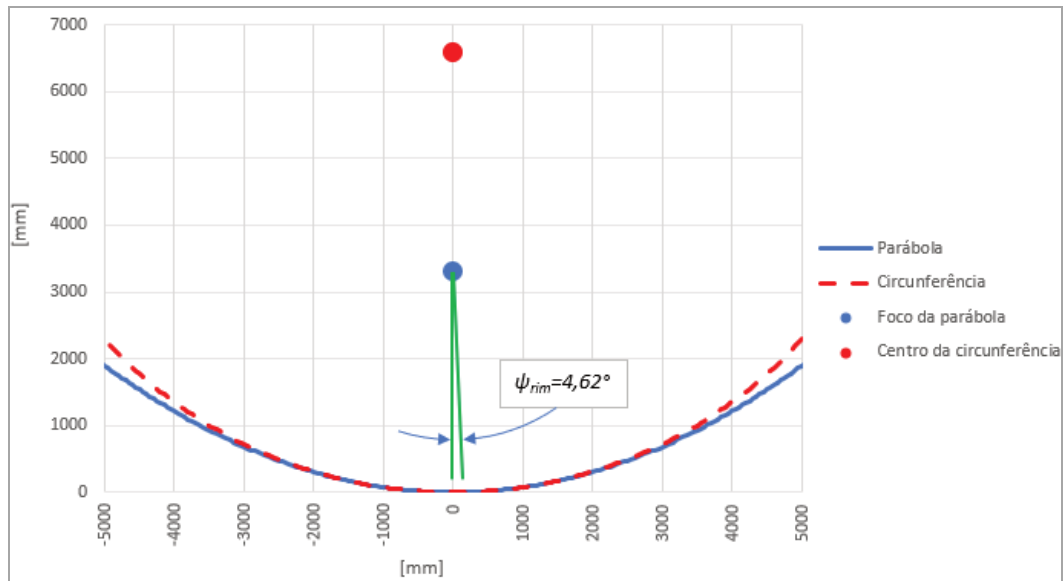


Figura 5.19 - Comparação do perfil parabólico e cilíndrico na região de maior ângulo de borda.

Observa-se pela Figura 5.19 que, mesmo na região de maior ângulo de borda, a curvatura de espelhos cilíndricos e parabólicos é equivalente.

Também foi avaliada a diferença nas curvaturas de espelhos cilíndricos e parabólicos, como pode ser visto na Figura 5.20.

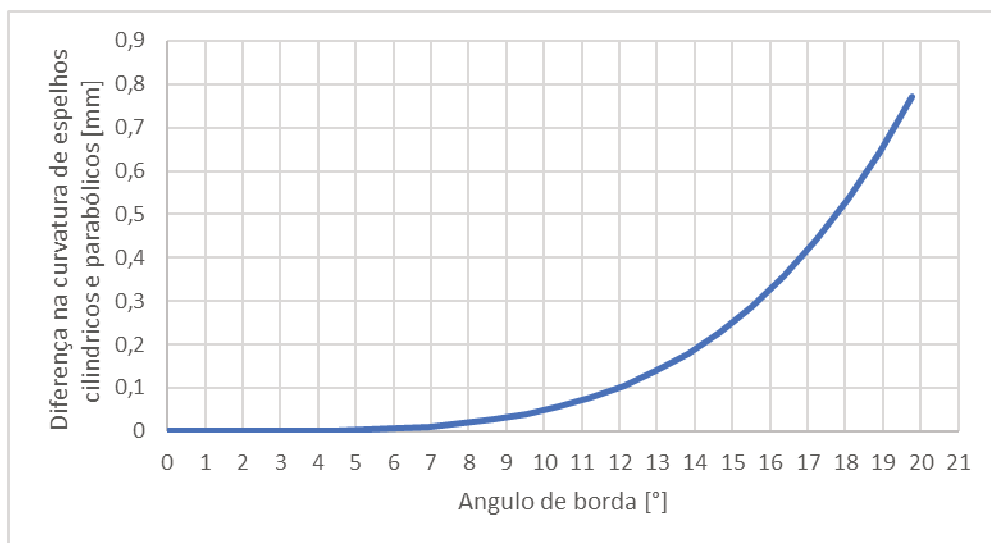


Figura 5.20 - Diferença entre curvatura de espelhos cilíndricos e parabólicos.

Como pode ser observado, para ângulos de borda pequenos, as diferenças na curvatura de espelhos cilíndricos e parabólicos são mínimas. Para o ângulo de borda máximo simulado, que foi de $4,62^\circ$, o erro entre a curva da parábola e da circunferência produziu um erro máximo de 0,002 mm.

Nos próximos subcapítulos, o comportamento de LFR com espelhos curvados será analisado independentemente se o espelho for cilíndrico ou parabólico, uma vez que, para pequenos ângulos de borda, os resultados são similares.

5.6 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA GEOMÉTRICA PARA ESPELHOS CILÍNDRICOS OU PARABÓLICOS

Para as simulações de eficiência geométrica do LFR com espelhos cilíndricos ou parabólicos, os raios de curvaturas (ou distâncias focais) utilizadas foram aquelas ótimas, já apresentadas nos subcapítulos 5.3 e 5.5., e que representaram a menor dispersão da irradiância refletida no plano de entrada do absorvedor. Os parâmetros de abertura do campo de espelhos e espaçamento entre espelhos foram mantidos fixos e o número de espelhos, a largura dos espelhos e a altura do absorvedor variaram. Na Figura 5.21 é apresentado o gráfico da eficiência geométrica para espelhos cilíndricos e parabólicos.

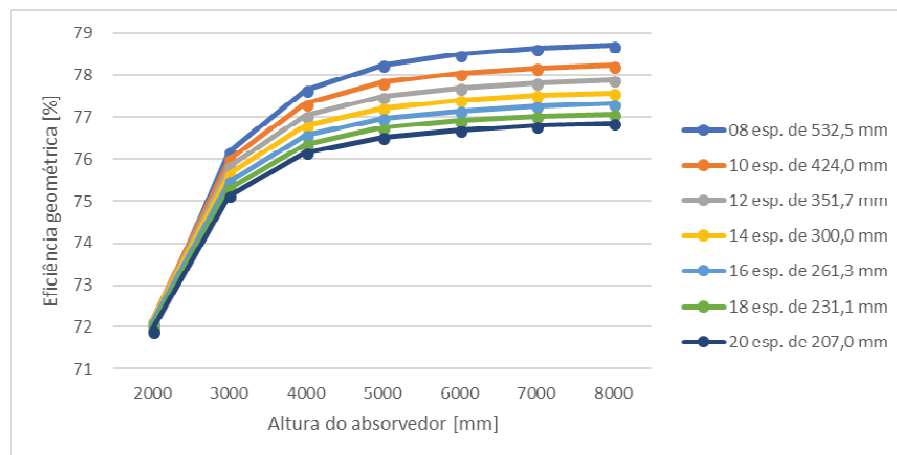


Figura 5.21 - Eficiência geométrica para LFR com espelhos cilíndricos ou parabólicos.

A eficiência foi menor para as menores alturas de absorvedor, sendo o mínimo valor de eficiência atingido para altura de absorvedor de 2000 mm. Nesta altura de absorvedor, a quantidade de espelhos não influenciou na eficiência. A partir de 3000 mm de altura de

absorvedor, já se observa, além de um aumento da eficiência, a influência do número de espelhos e, como consequência, da largura dos espelhos, na eficiência.

A partir da Figura 5.22 até a Figura 5.26 são apresentados os gráficos das perdas do LFR com espelhos cilíndricos ou parabólicos.

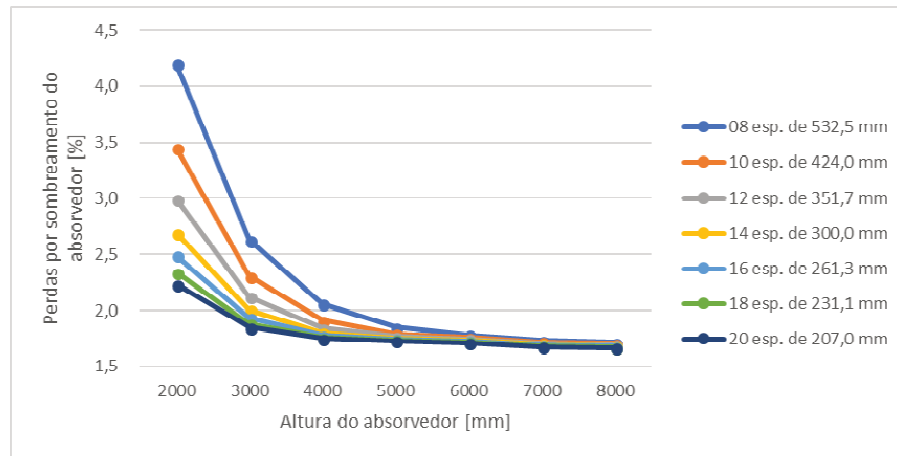


Figura 5.22 - Perdas por sombreamento do absorvedor em LFR com espelhos cilíndricos ou parabólicos.

Como mostrado na Figura 5.22, as perdas por sombreamento do absorvedor são maiores para baixas alturas de absorvedor. Quanto à largura dos espelhos, as perdas são maiores para espelhos mais largos. Isto se deve ao fato de que, para espelhos mais largos existe a necessidade também de absorvedores mais largos, o que causa um aumento no sombreamento do absorvedor sobre o campo de espelhos. Porém, para elevadas alturas do absorvedor, a quantidade de espelhos deixa de influenciar nas perdas.

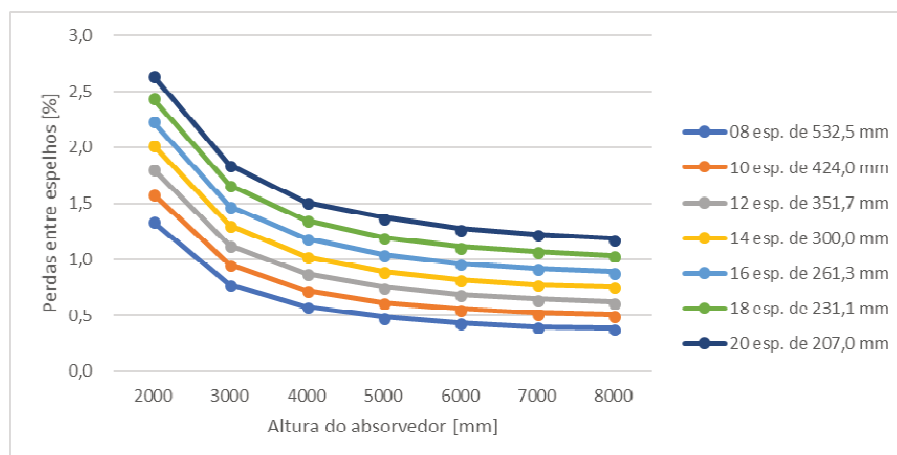


Figura 5.23 - Perdas entre espelhos para LFR com espelhos cilíndricos ou parabólicos.

Como observado na Figura 5.23, a quantidade de espelhos tem relação direta com a perda entre espelhos. Mesmo mantendo o espaçamento entre espelhos fixo, à medida que se aumenta o número de espelhos, também se aumenta a soma dos espaçamentos entre espelhos. Desta forma, as perdas entre espelhos ficam maiores à medida que se aumenta o número de espelhos. Em relação à altura do absorvedor, ocorreu diminuição das perdas com o aumento da altura do absorvedor. Isso se deve ao fato de que, com o absorvedor a uma altura maior, o ângulo de inclinação dos espelhos diminui, principalmente para horários próximos ao meio-dia. No caso limite, com o absorvedor a uma altura infinita e o Sol em sua elevação máxima, os espelhos estariam todos com inclinação igual a 0° , e o espaçamento entre espelhos seria mínimo.

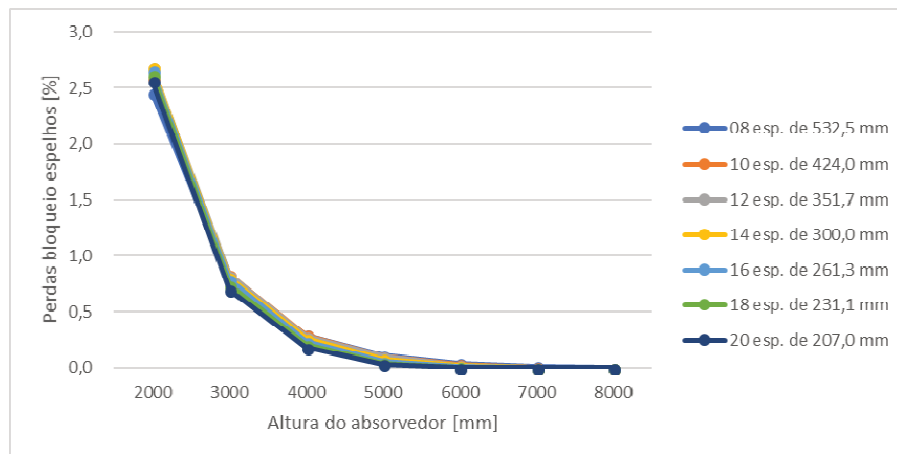


Figura 5.24 - Perdas por bloqueio em LFR com espelhos cilíndricos ou parabólicos.

Como mostrado na Figura 5.24, as simulações não apontaram relação entre as perdas por bloqueio pelos espelhos e a quantidade de espelhos. Porém, assim como nas perdas entre espelhos, também há relação com a altura do absorvedor, reduzindo as perdas à medida que se aumenta a altura do absorvedor.

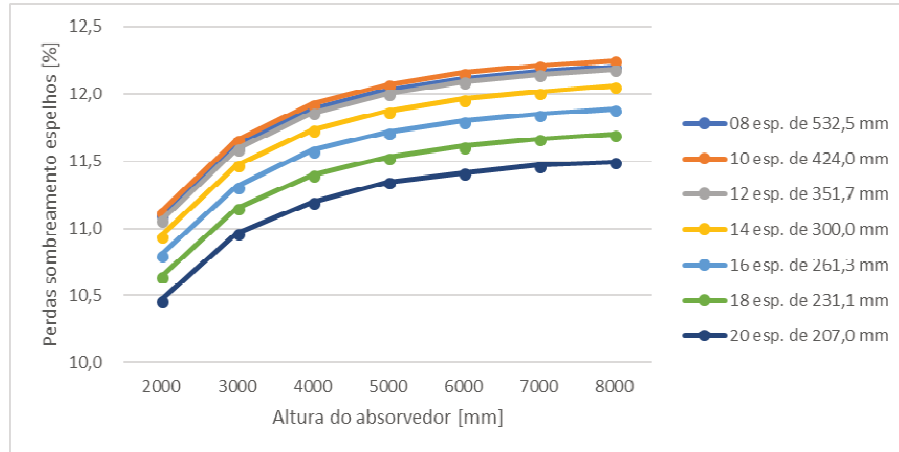


Figura 5.25 - Perdas por sombreamento dos espelhos em um LFR com espelhos cilíndricos ou parabólicos.

As perdas por sombreamento aumentam com o aumento da altura do absorvedor, como mostrado na Figura 5.25, mas diminuem com o aumento da quantidade de espelhos. Exceção foi o caso de 8 espelhos, que apresentou uma menor perda que o caso com 10 espelhos, indicando uma possível reversão da tendência, porém não foi possível determinar a causa desta exceção, que deveria ser melhor investigada.

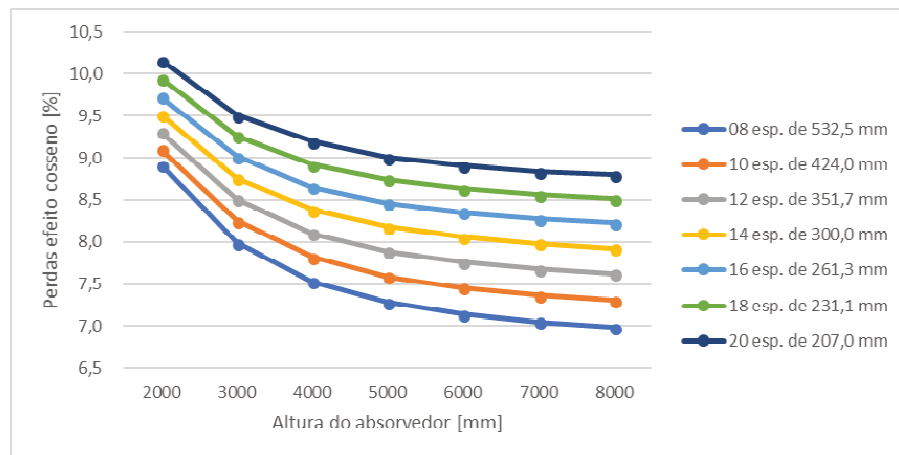


Figura 5.26 - Perdas por efeito cosseno em um LFR com espelhos cilíndricos ou parabólicos.

O efeito cosseno apresentou maiores perdas para menores alturas de absorvedor e para maiores quantidades de espelhos, como pode ser observado na Figura 5.26.

5.7 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA GEOMÉTRICA PARA ESPELHOS PLANOS

Para as simulações de eficiência geométrica para um LFR com espelhos planos, os parâmetros de abertura do campo de espelhos e espaçamento entre espelhos foram mantidos fixos enquanto que o número de espelhos, a largura dos espelhos e a altura do absorvedor variaram. Na Figura 5.27 é apresentado o gráfico da eficiência geométrica para espelhos planos.

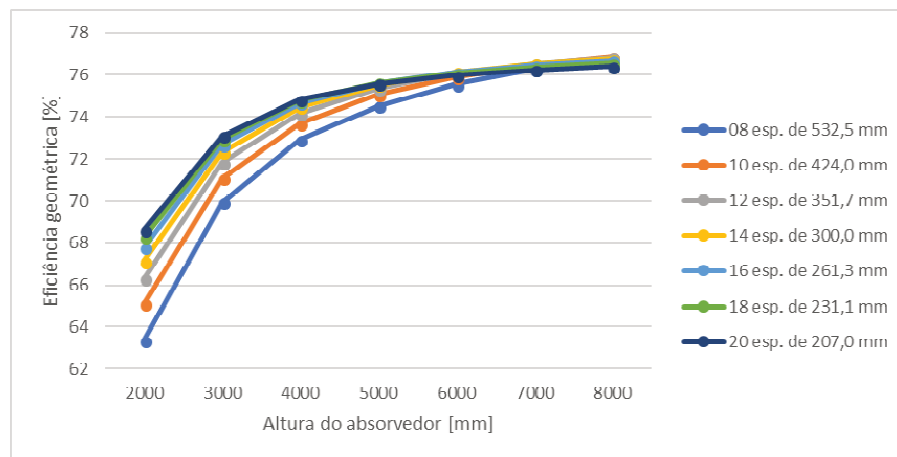


Figura 5.27 - Eficiência geométrica para LFR com espelhos planos em função da altura do absorvedor e da quantidade e largura dos espelhos.

A eficiência geométrica ficou menor para baixas alturas de absorvedor. Nessas condições, a eficiência mostrou estar diretamente relacionada com a quantidade de espelhos. A medida que a altura do absorvedor aumenta, a eficiência também aumenta, mas a quantidade de espelhos passa a ter menor influência. Aparentemente, a partir da altura de 7 m, a relação da eficiência com a quantidade de espelhos apresenta uma tendência de inversão, sendo que para o caso com mais espelhos, apresenta a menor eficiência.

A partir da Figura 5.28 até a Figura 5.32, são apresentados os gráficos das perdas de eficiência para um LFR com espelhos planos.

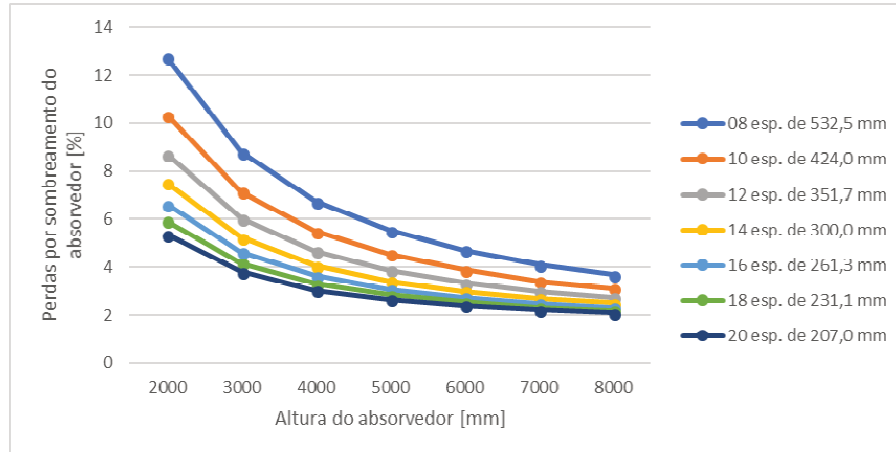


Figura 5.28 - Perdas por sombreamento do absorvedor em LFR com espelhos planos.

Como mostrado na Figura 5.28, as perdas por sombreamento do absorvedor são maiores para baixas alturas de absorvedor. Quanto à largura dos espelhos, as perdas são maiores para espelhos mais largos, pois neste caso, existe a necessidade também de absorvedores mais largos, o que causa um aumento no sombreamento do absorvedor sobre o campo de espelhos.

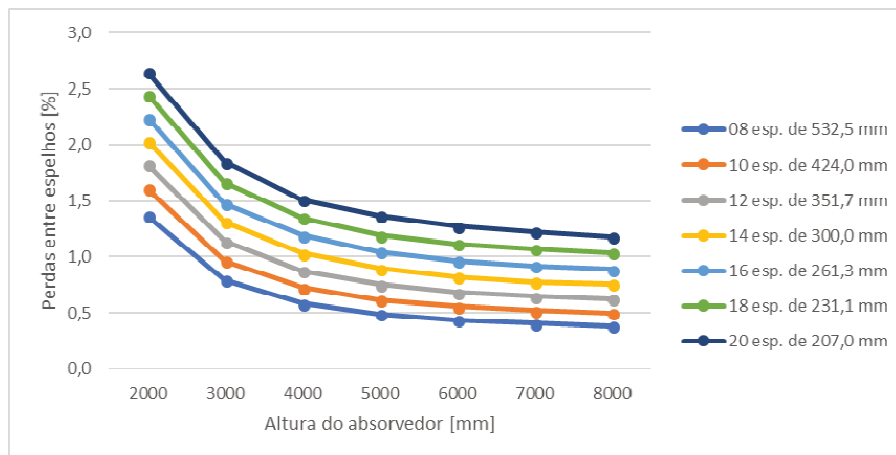


Figura 5.29 - Perdas entre espelhos para LFR com espelhos planos.

Como observado na Figura 5.29, as perdas entre espelhos ficam maiores à medida que se aumenta o número de espelhos, pois mesmo mantendo o espaçamento entre espelhos fixo, à medida que se aumenta o número de espelhos, também se aumenta a soma dos espaçamentos entre espelhos. Em relação à altura do absorvedor, ocorreu diminuição das perdas com o aumento da altura do absorvedor, pela redução do ângulo de inclinação dos espelhos durante sua operação.

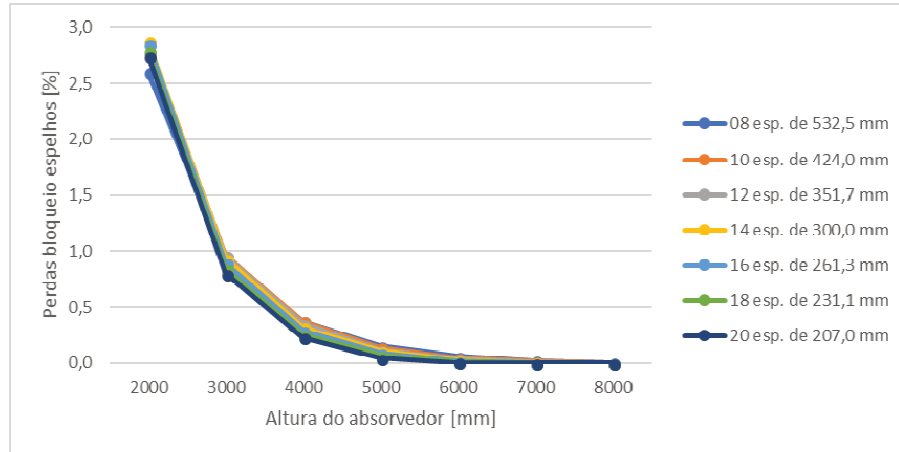


Figura 5.30 - Perdas por bloqueio entre espelhos em um LFR com espelhos planos.

Como mostrado na Figura 5.30, as simulações não apontaram relação entre as perdas por bloqueio pelos espelhos e a quantidade de espelhos. Porém, assim como nas perdas entre espelhos, as perdas por bloqueio entre espelhos diminuem à medida que se aumenta a altura do absorvedor.

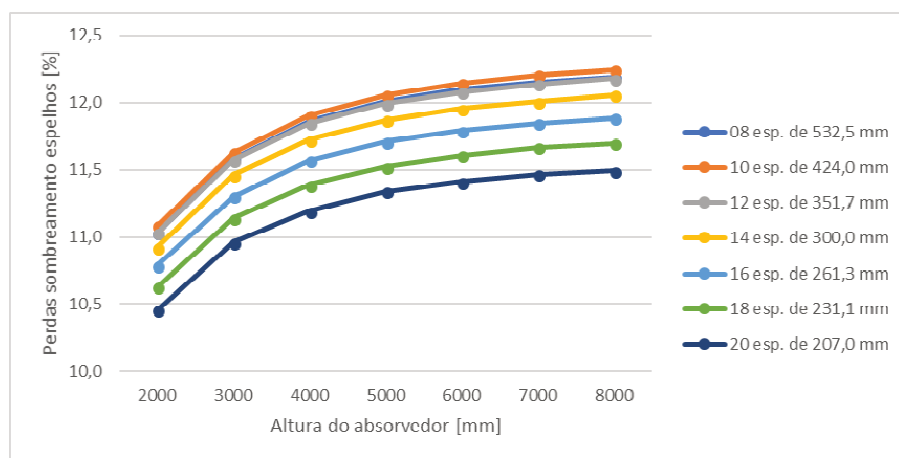


Figura 5.31 - Perdas por sombreamento dos espelhos em um LFR com espelhos planos.

As perdas por sombreamento aumentam com o aumento da altura do absorvedor, como mostrado na Figura 5.31, mas diminuem com o aumento da quantidade de espelhos. Assim como para espelhos cilíndricos ou parabólicos, no caso de 8 espelhos houve uma menor perda quando comparado com o caso de 10 espelhos.

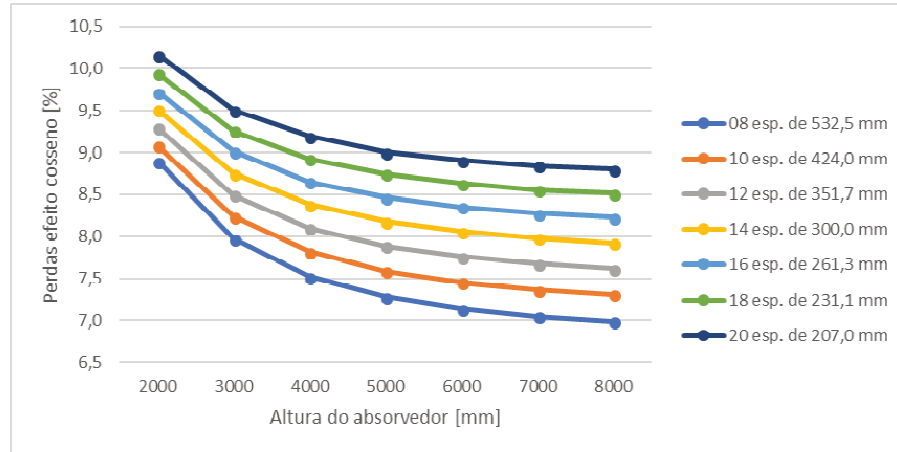


Figura 5.32 - Perdas por efeito cosseno em um LFR com espelhos planos.

O efeito cosseno apresentou maiores perdas para menores alturas de absorvedor, e para maiores quantidades de espelhos.

5.8 COMPAÇÃO DENTRE LFR COM ESPELHOS CILINDRICOS OU PARABÓLICOS E PLANOS

O LFR com espelhos cilíndricos ou parabólicos, com raio de curvatura ou distância focal adequados, apresentaram eficiência maior que o LFR que utiliza espelhos planos. Este aumento da eficiência se deu, principalmente, porque com espelhos curvados, é possível reduzir a dispersão da radiação refletida ao plano de entrada do absorvedor, possibilitando a utilização de absorvedores mais estreitos e, com isto, reduzir as perdas por sombreamento do absorvedor sobre o campo de espelhos. Isto é comprovado quando são analisados os gráficos das perdas, onde observa-se que apenas os gráficos de perdas por sombreamento do absorvedor apresentam uma grande diferença, quando comparados LFR com espelhos cilíndricos ou parabólicos e espelhos planos.

Em relação as demais perdas, é razoável que apresentem valores similares, pois para os parâmetros de curvatura utilizados, pouco diferem os espelhos cilíndricos ou parabólicos dos espelhos planos, conforme pode ser observado na Figura 5.33.

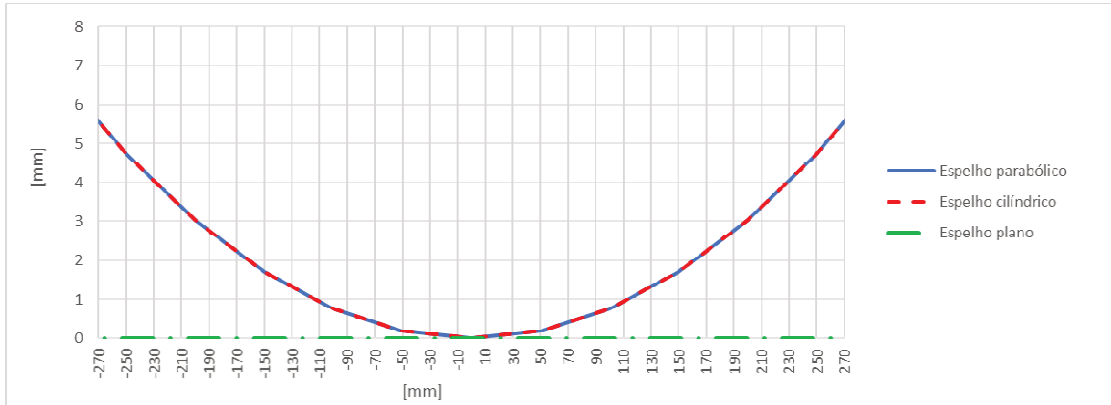


Figura 5.33 - Comparação entre espelhos cilíndricos ou parabólicos e planos.

Observando-se a Figura 5.33, é possível concluir que, mesmo no caso do espelho mais largo simulado, com 532,5 mm de largura, a maior diferença entre os espelhos curvados e plano não passou de 5,5 mm. Com isso, as perdas como bloqueio e sombreamento de espelhos, perdas entre espelhos e efeito cosseno, apresentaram pouca variação em função da curvatura dos espelhos.

6 CONCLUSÕES

Nesta dissertação, foram apresentados os resultados de um estudo para avaliar o desempenho geométrico de um refletor Fresnel linear, LFR, variando os parâmetros construtivos. Os parâmetros analisados foram o formato dos espelhos (plano, cilíndrico e parabólico), o espaçamento entre os espelhos, a largura dos espelhos, a quantidade de espelhos e a altura do absorvedor em relação ao plano contendo os eixos dos espelhos. As avaliações foram realizadas por meio de um código desenvolvido em MATLAB, que foi validado utilizando o programa SolTrace.

Foi possível determinar a largura ótima do absorvedor, que teve seu valor definido em função da dispersão da irradiância refletida pelos espelhos. Foi possível concluir que a utilização de espelhos curvados, com raios de curvatura ou distâncias focais adequadas, diminui a dispersão da radiação refletida no plano de entrada do absorvedor, quando comparado com a utilização de espelhos planos. O estudo também apresentou as curvaturas que minimizam a dispersão da radiação no absorvedor. Foi possível determinar equações para aproximar a distância focal para espelhos cilíndricos e raio de curvatura de espelhos cilíndricos, que minimizam a dispersão da radiação no plano de entrada do absorvedor, em função da abertura do LFR e da altura do absorvedor. Não foram observadas diferenças na utilização de espelhos curvados com perfil parabólico ou cilíndrico, uma vez que os ângulos de borda para esses espelhos são muito pequenos e, nesse caso, ambos apresentam dimensões muito semelhantes.

Também foi possível concluir que, para espelhos com pequeno ângulo de borda, a distância focal equivale à metade do raio de curvatura. A redução da dispersão da radiação refletida no plano de entrada do absorvedor possibilita a utilização de absorvedores mais estreitos e com isso reduzir as perdas por sombreamento do absorvedor sobre o campo de espelhos. Assim, a utilização de espelhos curvados melhora a eficiência geométrica do LFR.

O aumento da altura do absorvedor ocasiona melhora na eficiência geométrica, mesmo com uma maior dispersão da radiação no plano do absorvedor.

O espaçamento entre espelhos deve ser o mínimo, pois quanto maior, maiores serão as perdas entre os espelhos. Este valor mínimo depende do projeto mecânico, já que deve existir um espaçamento com dimensão suficiente para que ocorra a movimentação dos espelhos sem riscos de interferências.

Para a quantidade de espelhos, os resultados foram diferentes para espelhos planos e para espelhos curvados. Para os planos, a utilização de uma quantidade de espelhos maior e mais estreitos, proporciona uma maior eficiência em baixas alturas de absorvedor. Porém, para alturas de absorvedor a partir de 7 m, a quantidade de espelhos não tem mais influência sobre a eficiência. Para espelhos curvados, com o absorvedor a 2 m de altura, a quantidade de espelhos não afetou a eficiência. Porém, para alturas maiores, a diminuição da quantidade de espelhos e o aumento da largura dos espelhos, causou um aumento na eficiência.

Os resultados aqui mostrados podem ser utilizados para um projeto inicial de um refletor Fresnel linear, uma vez que fornecem indicações sobre as relações geométricas entre os seus componentes.

Alguns aspectos importantes sobre o desempenho de refletores Fresnel lineares não foram abordados nesse estudo e poderiam ser considerados em trabalhos futuros, tais como:

- a) A análise, utilizando traçado de raios, da melhor geometria e do desempenho de concentradores secundários;
- b) A inclusão do parâmetro de relação de concentração (área de abertura dos espelhos em relação a área do absorvedor), no critério para definição dos parâmetros geométricos;
- c) Estudar as perdas devido a imperfeições nas superfícies dos espelhos e erros no sistema de posicionamento dos espelhos;
- d) Analisar as trocas térmicas e perdas que ocorrem no absorvedor;
- e) Incluir análise econômica como parâmetro para definição da melhor geometria do LFR.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, R.; MARTÍNEZ-VAL, J. M. Analytic optical design of linear Fresnel collectors with variable widths and shifts of mirrors. **Renewable Energy**, v. 75, p. 81–92, 2015.
- BITTENCOURT, A. et al. **Optical Simulation To Find Optimum Configuration of a Solar Concentrator Workbench Using Linear Fresnel Technology**. Daegu, Korea: 2015
- BUIE, D. **Optical considerations in solar concentrating systems**. [s.l.] University of Sydney, 2004.
- BUIE, D.; MONGER, A. G.; DEY, C. J. Sunshape distributions for terrestrial solar simulations. **Solar Energy**, v. 74, n. 2, p. 113–122, 2003.
- CHAVES, J. **Introduction to Nonimaging Optics**. 2nd. ed. Madrid: CRC Press, 2016.
- COLE, I. R. **Modelling CPV**. [s.l.] Loughborough University, 2015.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 4th. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
- GOSWAMI, D. Y. **Principles of solar engineering**. 3rd. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- GÜNTHER, M. Linear Fresnel Technology. **Advanced CSP Teaching Materials**, p. 1–43, 2011.
- HÄBERLE, A. Linear Fresnel Collectors. In: RICHTER, C.; GUEYMARD, C. A.; LINCOT, D. (Eds.). **Solar Energy**. 1. ed. New York: Springer, 2013. p. 744.
- IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Vancouver: Academic Press, 1983.
- IRENA. Renewable Energy Technologies Cost Analysis Series: Concentrating Solar Power. **Comprehensive Renewable Energy**, v. 3, n. 2, p. 595–636, 2012.
- KALOGIROU, S. A. **Solar energy engineering: process and systems**. 1st. ed. San Diego: Academic Press, 2009.
- KASTEN, F.; YOUNG, A. T. Revised optical air mass tables and approximation formula. **Applied Optics**, v. 28, n. 22, p. 4735–4738, 1989.
- LANCEREAU, Q. et al. Wind Loads on Linear Fresnel Reflectors' Technology: A Numerical Study. **Energy Procedia**, v. 69, p. 116–125, 2015.
- LIN, M. et al. Experimental and theoretical analysis on a linear Fresnel reflector solar collector prototype with V-shaped cavity receiver. **Applied Thermal Engineering**, v. 51, n. 1–2, p. 963–972, 2013.

MATHUR, S. S.; KANDPAL, T. C.; NEGI, B. S. OPTICAL DESIGN AND CONCENTRATION CHARACTERISTICS OF LINEAR FRESNEL REFLECTOR SOLAR CONCENTRATORS--I. MIRROR ELEMENTS OF VARYING WIDTH. **Energy Conversion and Management**, v. 31, n. 3, p. 205–219, 1991.

MERTINS, M. **Technische und wirtschaftliche Analyse von horizontalen Fresnel-Kollektoren**. [s.l.] Universität Karlsruhe, 2009.

MULLER, J. C. **ESTUDO GEOMÉTRICO DE UM REFLETOR FRESNEL LINEAR PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA**. [s.l.] UNISINOS, 2016.

NREL. **SOLTRACE**. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/csp/soltrace.html>>. Acesso em: 18 dez. 2017.

RIGOLLIER, C.; BAUER, O.; WALD, L. On the clear sky model of the ESRA - European Solar Radiation Atlas - With respect to the Heliosat method. **Solar Energy**, v. 68, n. 1, p. 33–48, 2000.

RÔSSA, C. H. **SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE ENERGIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM CONEXÃO COM A REDE ELÉTRICA**. [s.l.: s.n.].

SCALCO, P. **ANÁLISE ÓPTICA E TÉRMICA DO RECEPTOR DE UM SISTEMA DE CONCENTRADORES FRESNEL LINEARES**. [s.l.] UNISINOS, 2016.

SMITH, W. J. **Modern Optical Engineering**. 3rd. ed. EUA: McGraw-Hill, 2000.

SONNENENERGIE. **Sonnenenergie**. Disponível em: <<https://de.solar-energy.technology/>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

WALKER, G. S. **Development of a Low Cost Linear Fresnel Solar Concentrator**. [s.l.] Stellenbosch, 2013.

WENDELIN, T.; DOBOS, A.; LEWANDOWSKI, A. SolTRACE: A New Optical Modeling Tool for Concentrating Solar Optics. **Solar Energy**, n. October, p. 253–260, 2013.

YELLOWHAIR, J.; CHRISTIAN, J. M.; HO, C. K. **EVALUATION OF SOLAR OPTICAL MODELING TOOLS FOR MODELING COMPLEX RECEIVER GEOMETRIES**. 8th International Conference on Energy Sustainability. **Anais...**Boston: 2014

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