

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

**ESTUDO GEOMÉTRICO DE UM REFLETOR FRESNEL LINEAR PARA
PRODUÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA**

JAIR CARLOS MULLER

Dissertação de Mestrado

São Leopoldo, agosto de 2016

ESTUDO GEOMÉTRICO DE UM REFLETOR FRESNEL LINEAR PARA
PRODUÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA

Jair Carlos Muller

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

Orientador: Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan

Coorientador: Profa. Dra. Jacqueline Biancon Copetti

Banca examinadora:

Profa. Dra. Maria Luiza Sperb Indrusiak (PPGEM – Unisinos)

Prof. Dr. Paulo Roberto Wander (PPGEM – Unisinos)

Prof. Dr. Arno Krenzinger (Promec – UFRGS)

São Leopoldo, agosto de 2016

M958e Muller, Jair Carlos.
Estudo geométrico de um refletor fresnel linear para produção de energia térmica / Jair Carlos Muller. – 2016.
100 p. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.
“Orientador: Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan ; coorientador: Profa. Dra. Jacqueline Biancon Copetti.”

1. Energia solar térmica. 2. Refletor Fresnel linear. 3. Rastreador solar. I. Título.

CDU 621

Á Deus.
Aos meus pais, Belmonte Muller (in memoriam)
e Elcira Corrêa de Moraes.
Á minha esposa Joana Maria Vier Muller e meu
Filho amado Vitor Vier Muller.

AGRADECIMENTOS

À CNPq, pelo apoio financeiro para conclusão do mestrado.

Ao Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan, pelo auxílio, estímulo, liberdade e confiança referente ao presente trabalho, além da excelente orientação.

Ao Profa. Dra. Jacqueline Biancon Copetti por todo apoio prestado e contribuições.

Aos professores participantes da banca examinadora pelo tempo, pelas colaborações e sugestões bastante pertinentes ao presente trabalho.

Aos colegas do mestrado pelos momentos de alegria, pelos cafés, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo geométrico de um refletor Fresnel linear para a produção de energia térmica com uso de um rastreador solar para orientação dos espelhos. A realização deste trabalho teve como base o estudo do sistema de coordenadas empregado para o cálculo da inclinação dos espelhos em função da posição do Sol em um determinado instante. O método utilizado considera que a radiação direta proveniente do Sol atinja o centro do espelho, cuja inclinação a cada instante permite a reflexão dessa radiação para o centro do absorvedor, situado a uma dada altura em relação ao plano contendo o eixo dos espelhos. Através do estudo da inclinação dos espelhos, foram analisadas as influências causadas pela distância entre espelhos, altura do receptor, largura dos espelhos e o número de espelhos. Com estes parâmetros analisados, implementou-se uma simulação em MATLAB que forneceu valores de potência refletida no plano de entrada do concentrador secundário, valores de perdas por sombreamento, bloqueio, desfocagem e posição angular de cada fileira de espelho. Tendo estes dados como base foi construído um rastreador solar controlado por um micro controlador Arduino, que permite orientar as fileiras de espelhos com um único motor e eixo de acoplamento. O programa no micro controlador verifica data e hora como dados iniciais, depois as coordenadas geográficas de latitude $29^{\circ} 45' 17,979''$ S e longitude $51^{\circ} 9' 1,019''$ W do local. Assim, foi possível comprovar, através de imagens refletidas pelos espelhos no receptor secundário, que os parâmetros de posição angular estão corretos e que a concentração dos raios solares no absorvedor do concentrador secundário tem precisão adequada, fornecendo ao sistema confiabilidade para sua utilização.

Palavras chave: Energia solar térmica; Refletor Fresnel linear; Rastreador solar.

ABSTRACT

This paper presents a geometric study of a linear Fresnel reflector for the production of thermal energy with use of a solar tracker for orientation of mirrors. This work was based on the study of the coordinate system used for the calculation of the slope of the mirrors as function of the sun's position at a given time. The method considers that the solar direct radiation reaches the center of the mirror, whose slope at each instant allows the reflection of this radiation to the center of the absorber located at a given height from the plane containing the axis of the mirrors. Through the study of slope of mirrors, were analyzed the influences caused by the distance between mirrors, the height of receiver, width of the mirrors and the number of mirrors. With these parameters, it was implemented a simulation in MATLAB which provided power values reflected in the secondary concentrator inlet plane, values of losses by shading, blocking, by defocus and the angular position of each row of mirror. Having these data as base was built a controlled solar tracker by an Arduino micro controller, which allows directing the rows of mirrors with a single engine and coupling shaft. The program in micro controller checks the date and time as initial data, then the geographical coordinates of latitude $29^{\circ} 45' 17.979''$ S and longitude $51^{\circ} 9' 1.019''$ W the local. Thus, it was possible to prove, through images reflected by mirrors on the secondary receiver, that the angular position parameters are correct and that the concentration of sunrays in the absorber secondary hub has adequate accuracy, providing the system reliability for its use.

Key words: Solar Energy thermal; Linear Fresnel reflector; Solar Tracker.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Cenário da oferta mundial de combustíveis fósseis e de urânio.	16
Figura 1.2 Percentuais das participações dos GEE no efeito estufa.	17
Figura 1.3 Mapa da radiação direta no Brasil.	18
Figura 2.1 Estrutura do Sol.	24
Figura 2.2 Modelo de concentrador tipo calha parabólica.	25
Figura 2.3 Detalhe de uma planta SEGS localizada no deserto de Mojave, EUA.	27
Figura 2.4 Planta solar tipo torre central SolarTwo, localizada nos EUA.	28
Figura 2.5 Esquema de planta solar tipo torre com uso de vapor.	29
Figura 2.6 Esquema de uma planta solar tipo torre com uso de sal fundido.	29
Figura 2.7 Refletores Fresnel ideais para o caso de irradiação direta perpendicular ao plano dos espelhos.	30
Figura 2.8 Esquema de uma planta com geração direta de vapor utilizando LFR.	31
Figura 2.9 Planta LFR em Calasparra, Espanha.	31
Figura 2.10 Esquema de concentrador tipo disco parabólico.	32
Figura 2.11 Detalhe de uma planta solar tipo disco parabólico, localizada no Arizona, EUA.	33
Figura 2.12 Equação do tempo em função do dia do ano.	36
Figura 2.13 Caminho aparente do Sol e o ângulo de declinação solar.	37
Figura 2.14 Representação mostrando a projeção do equador celeste. O ponto central da figura é a Terra.	38
Figura 2.15 Variação anual de G_{on} em função do dia do ano.	39
Figura 2.16 Curva típica da irradiância de um dia céu claro.	42
Figura 3.1 Representação da posição dos espelhos e do absorvedor em um LFR.	45
Figura 3.2 Sistema de coordenadas para os ângulos do Sol.	46
Figura 3.3 Sistema refletor Fresnel Linear e os ângulos de orientação.	47
Figura 3.4 Ângulo de incidência da radiação solar no centro do absorvedor.	48
Figura 3.5 Espaçamento entre espelhos Δx e sombreamento entre espelhos adjacentes.	49
Figura 3.6 Representação das perdas por sombreamento entre os espelhos.	50
Figura 3.7 Representação da geometria dos espelhos para o cálculo de L_1	51
Figura 3.8 Representação da geometria dos espelhos para o cálculo de L_2	51
Figura 3.9 Altura do receptor, H, e as perdas por bloqueio nos espelhos.	52
Figura 3.10 Geometria dos espelhos para o cálculo das perdas por bloqueio.	53
Figura 3.11 Reflexão difusa e Reflexão direta	54

Figura 4.1 Modelo criado em MATLAB mostrando um sistema LFR.	58
Figura 4.2 Modelo de fluxograma lógico do LFR – MATLAB.	59
Figura 4.3 Estimativa da potência incidente no plano de abertura do concentrador secundário, no equinócio de outono.	61
Figura 4.4 Estimativa da potência incidente no plano de abertura do concentrador secundário, no equinócio de primavera.	61
Figura 4.5 Estimativa da potência incidente no plano de abertura do concentrador secundário, no solstício de verão.	62
Figura 4.6 Estimativa da potência incidente no plano de abertura do concentrador secundário, no solstício de inverno.	62
Figura 4.7 Número de espelhos necessários para obter aproximadamente a mesma potência no plano de abertura do concentrador secundário, no equinócio de outono.	63
Figura 4.8 Número de espelhos necessários para obter aproximadamente a no plano de abertura do concentrador secundário, no equinócio de primavera.	63
Figura 4.9 Número de espelhos necessários para obter aproximadamente a mesma potência no plano de abertura do concentrador secundário, no solstício de inverno.	64
Figura 4.10 Número de espelhos necessários para obter aproximadamente a mesma potência no plano de abertura do concentrador secundário, no solstício de verão.	64
Figura 4.11 Estimativa da potência incidente no plano de abertura do concentrador secundário em função da altura do receptor.	65
Figura 4.12 Perdas por desfocagem no receptor.	66
Figura 4.13 Estimativa da potência incidente no plano de abertura do concentrador secundário, em função da largura do receptor.	67
Figura 4.14 Estimativa da potência incidente no plano do concentrador secundário em função da separação entre espelhos e da largura dos espelhos.	68
Figura 4.15 Perdas por sombreamento em função do número de espelhos para um ângulo de incidência, λ , de 60°.	68
Figura 4.16 Perdas por bloqueio para diferentes números de espelhos, para um ângulo de incidência, λ , igual a 60°.	69
Figura 4.17 Perdas por bloqueio para diferentes números de espelhos, para um ângulo de incidência, λ , igual a 0°.	69
Figura 5.1 Protótipo do concentrador em tamanho reduzido.	71
Figura 5.2 – Receptor secundário (absorvedor).	72
Figura 5.3 Micro controlador Arduino.	72

Figura 5.4 Placa de controle do motor de passo – <i>driver</i>	73
Figura 5.5 Imagem de um motor de 200 passos por revolução.	73
Figura 5.6 Algoritmo com a lógica de funcionamento do sistema de seguimento solar.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Processos e temperaturas médias na indústria.....	20
Tabela 2.1 - Características do Sol.	23
Tabela 2.2 - Plantas de calha parabólica nos EUA.....	26
Tabela 2.3 - Comparação do desempenho e parâmetros técnicos para tecnologias CSP.....	34
Tabela 3.1 - Parâmetros ópticos usados no coletor LFR.	55
Tabela 4.1 - Períodos considerados para a análise do desempenho do LFR.....	57
Tabela 4.2 - Dados de entrada para a análise da influência do número de espelhos.....	60
Tabela 5.1 - Ângulos correspondentes para cada fileira de espelhos durante um período de Sol entre 7 h da manhã e 17 h da tarde (TSV).	70
Tabela 5.2 – Verificação da posição do espelho das 7:00 horas até 17 horas (TSV).....	76
Tabela 5.3 – Ângulos de incidência do Sol sobre a superfície coletora.	77

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMT	Ano Meteorológico Típico
CFC	Clorofluorcarboneto
CSP	Energia Solar Concentrada (<i>Concentrating Solar Power</i>)
ESRA	<i>European Solar Radiation Atlas</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GPS	Sistema de Posicionamento Global (<i>Global Positioning System</i>)
GS	Genesis solar
HTF	Fluido de Transferência de Calor (<i>Heat Transfer Fluid</i>)
IAG/USP	Instituto de Astronomia, Geofísica – Universidade de São Paulo
KSP	<i>Keahole Solar Power</i>
LFR	Coletor Fresnel linear (<i>Linear Fresnel reflector</i>)
MATLAB	Matrix Laboratory
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MNGSEC	<i>Martin next generation solar energy center</i>
MS	<i>Maricopa solar</i>
MTOE	1 milhão de toneladas de petróleo equivalente
NS1	<i>Nevada Solar One</i>
SEGS	<i>Solar Electric Generating System</i>
SGS	<i>Solana generating station</i>
SSP	<i>Saguaro solar power</i>
TES	Armazenamento de Energia Térmica (<i>Thermal Energy Storage</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

A_b	Área de bloqueio [m ²]
A_{po}	Área de perda óptica [m ²]
A_r	Área de reflexão [m ²]
A_s	Área de sombreamento [m ²]
E_f	Potência térmica absorvida pelo absorvedor [kW]
E_t	Equação do tempo
F_d	Função angular difusa
G_b	Irradiância direta [W/m ²]
G_d	Irradiância difusa [W/m ²]
G_{on}	Irradiância solar extraterrestre em um plano normal à radiação [W/m ²]
G_{sc}	Constante solar no topo da atmosfera, igual a 1367 W/m ²
H	Altura do absorvedor em relação ao plano dos eixos dos espelhos [m]
K	Fator de reflexão da cavidade
L_{loc}	Longitude local [°]
L_{st}	Longitude padrão [°]
m_r	Massa de ar
n	Dia do ano, variando de 1 a 365
N	Número de horas de Sol
Q_n	Distância do espelho em relação ao centro do coletor [m]
S_n	Distância entre os espelhos [m]
SR	Horário de pôr do Sol [h]
SS	Horário de nascer do Sol [h]
T_L	Coefficiente de Turbidez de Linke
T_n	Função de transmissão difusa
T_o	Hora oficial [h]
TSV	Tempo solar verdadeiro [h]
W	Tamanho do espelho [m]
Z	Altitude [m]

Símbolos Gregos

α_s^{true}	Elevação solar aparente, devido à refração da luz na atmosfera [°]
m_{\oplus}	Massa da terra [kg]
r_{\oplus}	Raio da terra [m]
α	Absortividade
α_s	Ângulo entre o centro do Sol e o plano do horizonte [°]
β	Ângulo de inclinação da superfície em relação ao plano horizontal [°]
γ	Fator de interseção
γ_a	Ângulo de azimute [°]
γ_s	Ângulo de azimute do Sol [°]
δ	Declinação solar [°]
δ_r	Profundidade óptica de Kasten - Rayleigh
$\Delta\alpha_{ref}$	Índice de refração da atmosfera
θ_n	Ângulo de inclinação do espelho [°]
θ_s	Ângulo formado entre o Sol e a normal de uma superfície [°]
θ_z	Ângulo zenital; ângulo formado entre o Sol e o zênite [°]
λ	Posição Solar [°]
ξ_n	Ângulo subtendido do Sol [°]
ρ	Refletividade
τ	Transmissividade atmosférica
φ	Ângulo de latitude local [°]
φ_n	Ângulo de incidência no centro do absorvedor [°]
ω	Ângulo horário [°]
ω_{sr}	Ângulo de pôr do Sol [°]
ω_{ss}	Ângulo de nascimento do Sol [°]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos.....	19
1.2 JUSTIFICATIVA	19
1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1 CONCENTRADORES SOLARES.....	22
2.2 CONHECENDO O SOL	23
2.3 TECNOLOGIAS DE CONCENTRAÇÃO.....	25
2.3.1 Calha parabólica.....	25
2.3.2 Torre solar.....	27
2.3.3 Refletor Fresnel linear.....	30
2.3.4 Prato parabólico	32
2.3.5 Comparação entre tecnologias	33
2.4 RASTREAMENTO SOLAR.....	34
2.4.1 Tempo solar verdadeiro ou hora solar	35
2.4.2 Ângulo horário.....	36
2.4.3 Movimento da Terra ao redor de seu eixo	37
2.4.4 Massa de ar	41
2.4.5 Modelo de radiação de céu claro - ESRA	41
2.4.6 Coeficiente de Turbidez de Linke	43
3 ASPECTOS GEOMÉTRICOS DO LFR.....	45
3.1 MODELAGEM DO CONCENTRADOR SOLAR	46
3.1.1 Distância entre espelhos	49
3.1.2 Altura do receptor	52
3.1.3 Propriedades ópticas do refletor Fresnel Linear	54
3.1.4 Sombreamento do receptor	55
4 SIMULAÇÃO DO CONCENTRADOR LFR EM MATLAB.....	57
4.1 POTÊNCIA INCIDENTE NO PLANO DE ABERTURA DO CONCENTRADOR	57
4.1.1 Influência do número de espelhos	60
4.1.2 Influência da altura do receptor	64

4.1.3 Efeito da largura do receptor	65
4.1.4 Efeito da separação entre os espelhos	67
4.1.5 Influência das perdas de área por sombreamento e bloqueio	68
5 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DO CONCENTRADOR SOLAR	70
5.1 SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO DOS ESPELHOS.....	72
5.1.1 Micro controlador.....	72
5.1.2 Motor e driver de controle	73
5.2 TESTES COM O PROTÓTIPO	75
6 CONCLUSÃO.....	78
REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

Por consequência do crescimento da população mundial, surge o aumento da demanda de energia. O atual cenário energético, predominantemente baseado em fontes não renováveis, está passando por um período de mudança. As fontes não renováveis, habitualmente chamadas de convencionais devido à larga utilização, são as que dependem de processos em escala de tempo geológica para se tornarem disponíveis, como é o caso dos combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo e gás natural) e dos combustíveis nucleares, como o urânio. Essas fontes estão disponíveis na natureza em quantidades limitadas e podem se extinguir com a exploração excessiva.

A Fig. (1.1) representa uma estimativa do início do declínio, à escala mundial, destas importantes fontes energéticas.

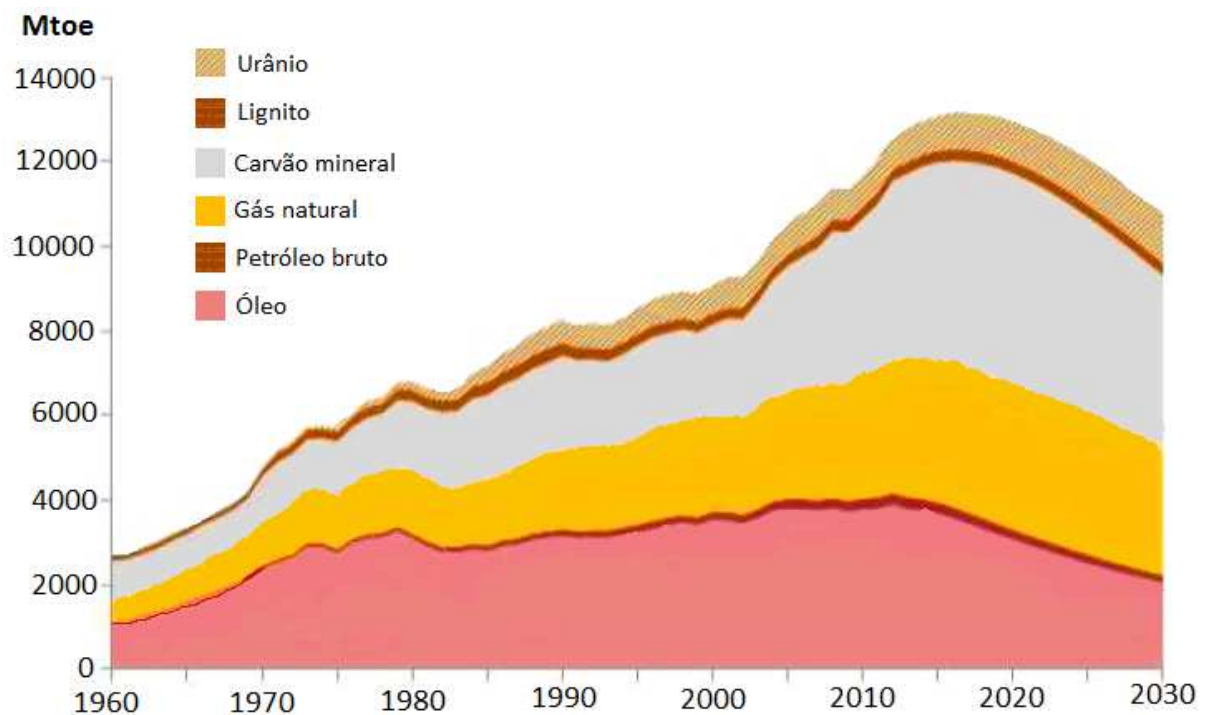


Figura 1.1 Cenário da oferta mundial de combustíveis fósseis e de urânio.

Fonte: EWG (2013).

Além disso, seu uso é responsável por danos ao meio ambiente e à sociedade, sendo que o mais grave é o efeito estufa, resultante das emissões de CO_2 produzidas a partir da queima destes combustíveis.

As usinas geradoras que utilizam esses combustíveis produzem não somente energia como também grandes quantidades de gases responsáveis pelo agravamento do efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO_2), alguns derivados de resíduos como o metano (CH_4),

o óxido nitroso (N_2O), entre outros gases como o perfluorcarbonetos (PFCs), clorofluorcarbonetos (CFC), hidrofluorcarbonetos (HFCs) e o hexafluoreto de enxofre (SF_6) (MCT, 2014). O fato é que os combustíveis fósseis são uma fonte de energia esgotável e, ainda assim, se configuram como a principal fonte de energia.

A Fig. (1.2) apresenta o percentual de cada gás de efeito estufa do total emitido no Brasil em 2012.

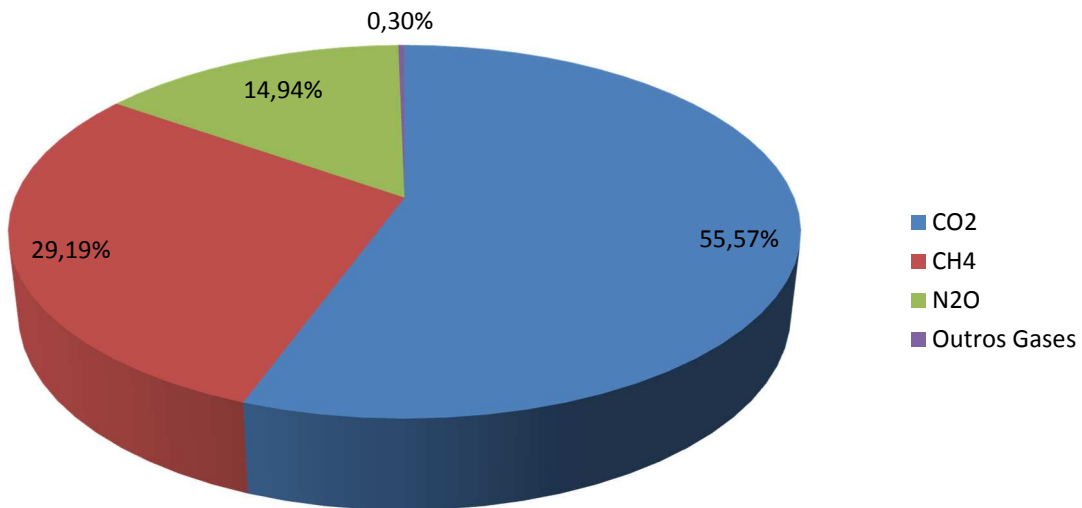


Figura 1.2 Percentuais das participações dos GEE no efeito estufa.

Fonte: MCT (2014).

O uso de energia solar pode substituir os processos de geração de energia mais poluentes. Um dos motivos que dificultam a disseminação de seu uso é seu custo relativamente maior do que as atuais plantas que queimam combustíveis fósseis. Porém, sua utilização traz vantagens no que se refere à fonte geradora, além de ser gratuita e disponível durante ano inteiro e pode aumentar sua demanda sem agredir o meio ambiente.

Locais potenciais no Brasil estão situados perto da linha do equador e este fato proporciona vantagens ópticas para os sistemas de concentração. Imensas áreas de terra estão disponíveis para aplicações solares térmicas.

A Fig. (1.3) mostra no mapa do Brasil as regiões semiáridas extensas com uma radiação direta normal da ordem de 2.200 kWh/m² em média anual. O maior potencial está localizado na Bacia do Rio São Francisco e nas áreas do Nordeste.

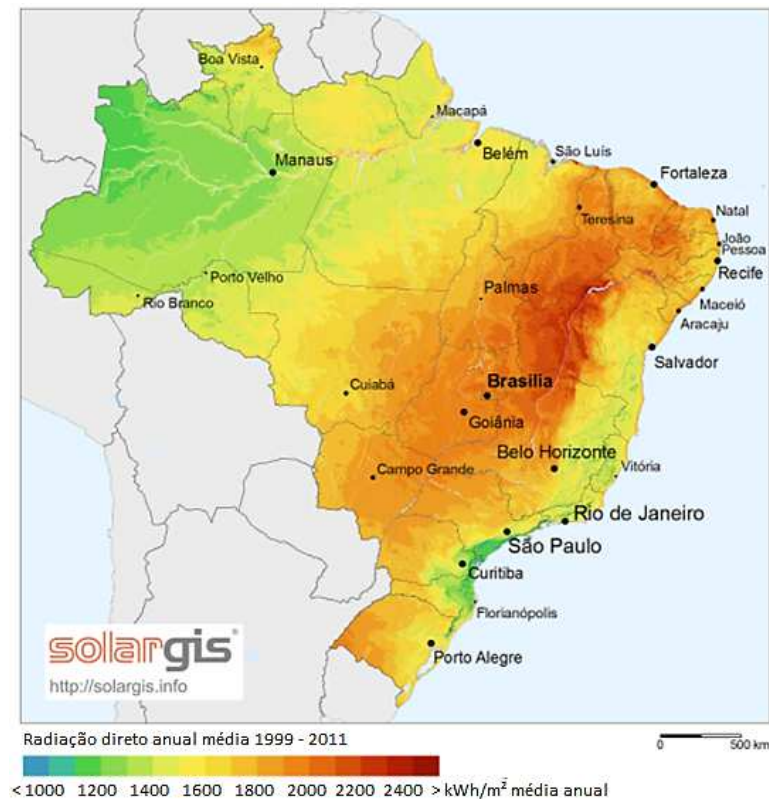


Figura 1.3 Mapa da radiação direta no Brasil.

Fonte: SolarPACES (2011).

Entre Teresina e Belo Horizonte há excelentes condições topográficas, acesso à rede, água de resfriamento, o acesso rodoviário, baixas velocidades de vento e temperatura ambiente moderada, com pouca variação diária. Esses locais recebem radiação solar direta anual entre 1.800 e 2.400 kWh/m² e podem facilmente acomodar usinas solares em grande escala.

Tais fontes alternativas possibilitam até mesmo uma planta reserva da matriz energética primária (no caso do Brasil, são as hidroelétricas e as termoelétricas), além de fomentar a geração de mão de obra qualificada e a criação de novos postos de trabalho nos locais pouco desenvolvidos do Nordeste brasileiro.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo dessa dissertação é o estudo geométrico de um refletor Fresnel linear, constituído de um arranjo de espelhos planos, orientados na posição norte-sul, sendo que apenas um eixo de seguimento irá movimentar todo o sistema. Este processo inicial de investigação procura estruturar o conhecimento, tendo como objetivo científico conceber conhecimento na aplicação da teoria. O fato da energia solar de concentração ser um assunto relativamente recente, comporta ainda muitas dúvidas sobre quais as tecnologias a escolher e/ou qual a melhor

concretização para cada uma delas (ALMEIDA, 2013). Embora o conhecimento teórico esteja disponível em diversas publicações internacionais, há um número relativamente pequeno de instalações utilizando LFR. No presente caso, os cálculos do sistema heliotérmico e o dimensionamento do sistema concentrador serão analisados e definidos por simulação em MATLAB.

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar, através do desenvolvimento de uma ferramenta computacional, a influência dos principais parâmetros geométricos de um concentrador Fresnel linear na irradiância solar incidente no plano de entrada do absorvedor. Ao mesmo tempo, utilizando os dados obtidos dessa ferramenta, desenvolver um sistema micro controlado para movimentar automaticamente os espelhos de forma que os raios solares incidentes sejam refletidos na abertura do absorvedor.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) desenvolver uma ferramenta de simulação para o traçado de raios;
- b) determinar a potência incidente no plano do concentrador;
- c) determinar a influência das propriedades ópticas e das perdas no sistema;
- d) analisar os diversos aspectos relacionados à construção e operação do LFR;
- e) teste do protótipo para movimentação dos espelhos de um LFR.

1.2 JUSTIFICATIVA

O uso da energia solar para produzir calor para processos industriais apresenta um enorme potencial de utilização nas suas diversas faixas de temperaturas de aplicações, podendo contribuir de forma significativa para a redução do uso de outras fontes convencionais, combustíveis fósseis ou energia elétrica para atender parte da demanda necessária nos processos produtivos.

A técnica de geração de energia heliotérmica consiste em uma sucessão de conversões energéticas. A radiação solar direta é concentrada em um absorvedor através de refletores que rastreiam continuamente a posição solar. Essa energia é transferida para um fluido de troca térmica, que é a fonte energética de um ciclo de potência convencional (Rankine, Brayton ou

Stirling), sendo convertida em energia mecânica, que por sua vez é convertida em energia elétrica, ou ainda para outras aplicações de uso direto do calor.

Além da geração de eletricidade, a energia heliotérmica também pode atender a processos térmicos industriais de médias e altas temperaturas. Este estudo, na verdade, visa atender especificamente a esses processos, apresentando uma solução para as indústrias que tenham processos com consumo contínuo de energia térmica. A Tab.(1.1) mostra setores e processos industriais com condições favoráveis de uso de energia solar.

Tabela 1.1 - Processos e temperaturas médias na indústria.

SETOR	PROCESSOS	TEMPERATURA, °C
Vinhos e bebidas	Limpeza de vasilhame	60 -90
Indústria têxtil	Lavagem,	< 90
	branqueamento	< 90
	tinturaria cozimento	85
Indústria de automóvel	Secagem de pinturas	160 - 220
	Desengorduramento	35 - 55
Indústria de papel	Polpa de papel	170 - 180
	Cozimento	< 90
	Branqueamento	130 - 150
	Secagem	130 - 160
Curtumes	Aquecimento de água para processos de secagem	Vapor de 165 - 180
Cerveja e malte	Fervura do mosto	100
	Limpeza do vasilhame	60
	Arrefecimento	90
	Secagem	60
Laticínios	Pasteurização	62 - 85
	Esterilização	130 - 150
	Secagem	
Alimentos em conserva	Esterilização	110 - 125
	Pasteurização	< 80
	Cozimento	70 - 98
	Escaldamento	95 - 100
	Branqueamento	< 90

Fonte: adaptado de SILVA (2012).

Na indústria, cerca de 50% da necessidade de energia térmica corresponde a temperaturas nas faixas: baixas ($<60\text{ }^{\circ}\text{C}$), médias ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$) e média-alta ($150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $250\text{ }^{\circ}\text{C}$). A percentagem mais alta do consumo de energia térmica nas faixas de média e média-alta temperatura está nos segmentos alimentares, papel e celulose, e têxtil e química. Entretanto, mais de 30% das necessidades de energia térmica está na faixa de temperaturas até $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (SILVA, 2012).

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 apresentam-se as revisões de trabalhos publicados, tipos de tecnologias de concentração, comparações entre tecnologias de CSP e a modelagem matemática que fundamenta as simulações e o rastreamento solar, justificando a linha de raciocínio tomada ao longo do trabalho referente aos métodos utilizados para os cálculos. O Capítulo 3 apresenta os aspectos geométricos de um LFR, a metodologia empregada para obtenção dos principais dados de entrada da ferramenta computacional MATLAB e da modelagem do concentrador solar. O Capítulo 4 traz análises e resultados obtidos através de simulações na plataforma MATLAB. A relação da potência incidente no plano secundário do concentrador e as influencias causadas pelos números de espelhos e altura do receptor, efeitos causados com a largura do receptor e separação entre fileiras de espelhos, bloqueios e sombreamentos. O Capítulo 5 apresenta o protótipo desenvolvido e a estrutura do sistema de rastreamento, usando como referência a tabela de ângulos obtidos na simulação em MATLAB para validar os dados de posição angular. O sistema de acionamento do motor e sua lógica de programação, *driver* de controle do sistema com os dados necessários para movimentar as fileiras de espelhos usando somente um eixo de acoplamento. Testes com o protótipo para validar as posições conforme dados do MATLAB. O Capítulo 6 são descritas as conclusões deste trabalho e sugestões para próximos trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nas sessões seguintes serão apresentados os conhecimentos teóricos que estruturam o presente estudo, justificando a linha de raciocínio tomada ao longo do trabalho referente aos métodos utilizados. As equações utilizadas nas rotinas de simulação computacional destinadas aos cálculos de posição, ângulo de inclinação, número de espelhos, altura, largura dos espelhos conforme posição temporal do Sol são apresentadas. Inicialmente, uma pequena revisão de alguns estudos similares realizados na área de energia solar térmica, que de alguma forma contribuíram com ideias a fim de formular o propósito do trabalho, será mostrada.

2.1 CONCENTRADORES SOLARES

Almeida (2013) desenvolveu uma pesquisa de um sistema termoelétrico do tipo refletor Fresnel linear. O trabalho aborda uma metodologia para o desenvolvimento desse concentrador solar, com especial atenção para as eficiências térmica e óptica, as quais estão relacionadas, respectivamente, com os aspectos de transferência de calor e com os parâmetros de construção. Os cálculos e medidas realizadas foram posteriormente analisados e comparados entre cada um dos sistemas de concentração solar com o intuito de, no final, avaliar o rendimento global dos sistemas.

Walker (2013) projetou e construiu um refletor Fresnel linear de baixo custo, com objetivo de aquecer água em um tanque, demonstrando a flutuação na produção de energia. O trabalho também destacou o fornecimento de grande quantidade de água a baixa temperatura, cruzando o custo de capital com os atuais sistemas elétricos ou caldeiras existentes.

Canavarro (2010) apresentou as etapas necessárias para construir um modelo de refletores Fresnel lineares. Através de um método numérico foi possível demonstrar suas potencialidades pela possibilidade de simulação e análise de ópticas genéricas, pela aproximação dos resultados conhecidos e pela capacidade de adaptação.

Haagen (2012) avaliou o potencial de geração de energia térmica para uso na indústria, utilizando refletores Fresnel lineares no Oriente Médio e Norte da África. Esta análise examinou os fatores que influenciam na taxa interna de retorno e nos custos de energia térmica por processos solares. Com essas comparações foi possível identificar os regimes de apoios adequados para o processo de geração de energia térmica. Com base nestes resultados o estudo pôde fornecer recomendações para sua utilização, tanto no setor público como no privado.

2.2 CONHECENDO O SOL

O Sol constitui-se de uma esfera gasosa brilhante, sustentada por sua própria gravidade e pelas forças geradas por reações nucleares que ocorrem no seu interior, com temperatura efetiva de corpo negro de aproximadamente 5.780 K. Comparado com outras estrelas, em termos de massa, raio, brilho e composição química, o Sol está na faixa média de valores desses parâmetros. Na Tab.(2.1) são apresentadas algumas de suas características:

Tabela 2.1 - Características do Sol.

Raio	9,96 x 10 ⁸ m	~ 109 r _⊕
Massa	1,99 x 10 ³⁰ kg	~ 330.000 m _⊕
Densidade	1410 kg m ⁻³	
Luminosidade	3,9 x 10 ²⁶ W	
Temperatura superficial	5.780 K	
Período de rotação	24,9 dias (no equador)	29,8 dias (nos polos)

Fonte: IAG/USP (2012).

Os gases presentes no interior do Sol (principalmente hidrogênio e hélio) encontram-se quase que completamente ionizados, pois estão submetidos a temperatura, pressão e densidade elevadíssimas, as quais aumentam muito dependendo da profundidade que estão dentro do Sol. Assim, na região mais central, as condições físicas propiciam as reações termonucleares de transformação do hidrogênio em hélio, liberando então grandes quantidades de energia na forma de fótons e movimentos térmicos.

O Sol é composto basicamente de um núcleo central rodeado por uma camada definida como zona radiativa, ambas circundadas por um envoltório convectivo. A região de transição entre o interior do Sol ao meio interestelar divide-se em três regiões: fotosfera, cromosfera e coroa. A Fig. (2.1) mostra a estrutura do Sol.

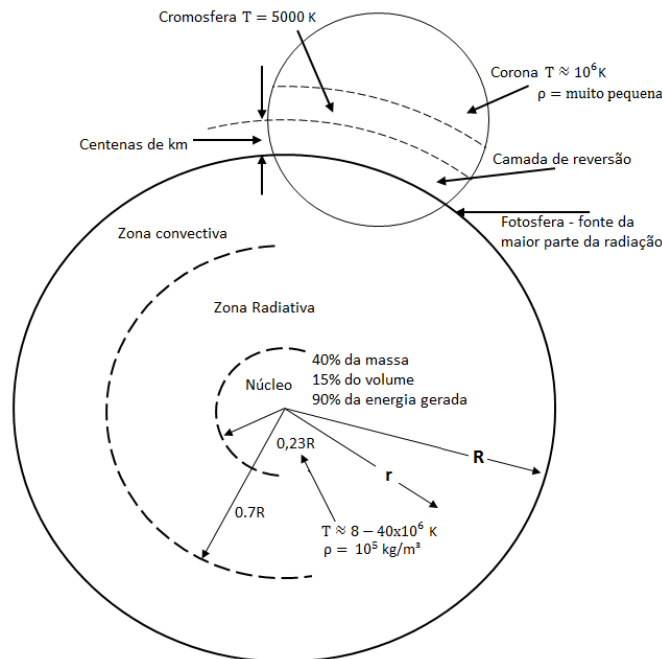


Figura 2.1 Estrutura do Sol.

Fonte: Adaptado do Duffie e Beckmann (2013).

A fotosfera é uma camada bastante estreita, com cerca de 500 km de espessura, apresentando uma temperatura de cerca de $5 \times 10^3 \text{ K}$ e uma densidade menor, favorecendo a diminuição da opacidade, permitindo que a radiação se propague livremente.

A cromosfera é muito maior que a fotosfera e sua espessura é de aproximadamente 2.000 km (incluindo a chamada região de transição). A variação de densidade é muito alta, com aumento de temperatura da base para o topo, sendo em média de $1,5 \times 10^4 \text{ K}$. Acredita-se que esse aquecimento dê origem à turbulência da zona convectiva, onde as ondas seriam excitadas e amplificadas em choques ao se propagarem nas regiões menos densas.

A coroa, com tamanho não definido, pode atingir vários raios solares e encontra-se no estado de plasma, que é uma forma de gás contendo íons e elétrons. Os elétrons e os íons formam os ventos solares que irão se propagar pelo espaço, podendo chegar até o nosso planeta, com velocidade média de 600 km/s.

A energia do Sol é transmitida para o nosso planeta através do espaço na forma de radiação eletromagnética. Essa radiação é constituída de ondas eletromagnéticas que possuem frequência e comprimentos de onda diferentes. A energia que uma onda pode transmitir está

associada à sua frequência. Quanto maior a frequência, maior a energia transmitida. A captação do calor solar é a transformação da energia eletromagnética em energia térmica pelos corpos e materiais que recebem sua radiação. Para a maioria das aplicações de engenharia é adotado o valor de 1.367 W/m^2 (IQBAL, 1983) como o valor da constante solar G_{sc} no topo da atmosfera terrestre, que é adotada nas simulações feitas no presente trabalho.

2.3 TECNOLOGIAS DE CONCENTRAÇÃO

Os sistemas de geração heliotérmica utilizam combinações de espelhos ou lentes para concentrar a radiação solar direta. Esses sistemas são compostos por diversas tecnologias em diferentes estágios de desenvolvimento, que convertem a radiação solar em energia térmica e, em seguida, utilizam tal energia para gerar eletricidade, vapor ou aquecimento de qualquer outro fluido para uso na indústria.

Há quatro tecnologias principais de concentração solar, denominadas de acordo com a geometria dos coletores (espelhos): calha parabólica, torre solar, Fresnel linear e prato parabólico (KALOGIROU, 2009). Cada processo de concentração é capaz de produzir elevadas temperaturas e eficiências termodinâmicas igualmente altas, mas variam com relação à captação solar como será visto a seguir.

2.3.1 Calha parabólica

Cada coletor tem um refletor parabólico que focaliza a radiação solar direta em um receptor linear (tubo absorvedor) localizado na linha focal da parábola, como pode ser visto na Fig. (2.2).

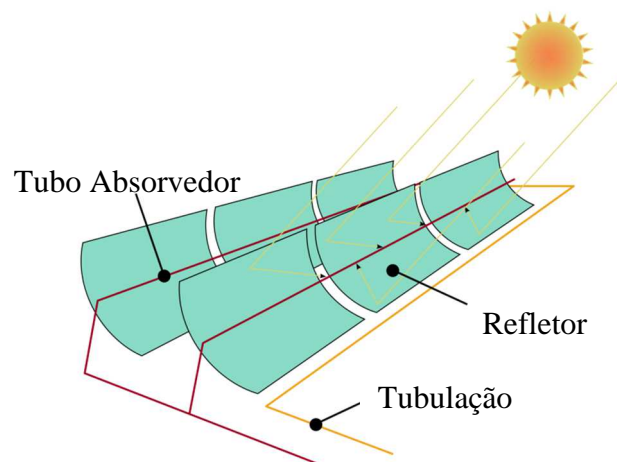


Figura 2.2 Modelo de concentrador tipo calha parabólica.

Fonte: SOLARPACES (2012).

No interior do tubo absorvedor circula um fluido de transferência de calor (HTF) (KALOGIROU, 2009). As plantas são então compostas por extensos campos de espelhos refletores, um sistema de geração de vapor a partir do fluido térmico, um sistema de potência (uma turbina a vapor operando no ciclo de Rankine) acoplada a um gerador elétrico, um sistema opcional de armazenamento de energia térmica (TES) e também opcionalmente um sistema de *backup* com queima de combustíveis fósseis.

As plantas heliotérmicas estão espalhadas pelo mundo, mas os EUA e a Espanha concentram a maior parte desses sistemas. As nove plantas de calha parabólica, ou SEGS (*Solar Electric Generating System*), nos Estados Unidos estão situadas em três diferentes locais no Deserto de Mojave, na Califórnia e as demais em outros locais conforme Tab. (2.2), onde mostram a localização e suas potências (KALOGIROU, 2009). Essas plantas funcionam em modo comercial operando até hoje, vendendo energia para rede elétrica.

Tabela 2.2 - Plantas de calha parabólica nos EUA.

Nome	Potência (MW)	Local	Ano	Temperatura °C	Nº de plantas
SEGS	354	Mojave Deserto Califórnia	1984	349 - 390	9
SSP	1	Red Rock	2006	120 - 300	1
NS1	64	Nevada	2007	250 - 300	1
KSP	2	Havaí	2009	93 - 176	1
MNGSEC	75	Flórida	2010	293 - 393	1
MS	1,5	Peoria, Arizona	2010	140 - 270	1
SGS	280	Oeste de Gila Bend, AZ	2013	371	1
GS	250	Blythe, California	2014	393	2

Fonte: KALOGIROU (2009).

A Fig. (2.3) mostra uma planta solar, localizada na Califórnia, com esta tecnologia. Os coletores rastreiam o Sol em um único eixo durante o dia onde a radiação direta incidente é continuamente focalizada no receptor linear, no qual o HTF é aquecido até aproximadamente 390 °C (KALOGIROU, 2009).



Figura 2.3 Detalhe de uma planta SEGS localizada no deserto de Mojave, EUA.

Fonte: MCKNIGHT, E. (2012).

Os coletores podem ser orientados com eixo leste-oeste, com rastreamento do Sol no sentido norte-sul. Neste caso, as vantagens são que o movimento ao longo do dia é menor e o coletor fica sempre apontado para o Sol ao meio-dia. Em contrapartida, tem um desempenho reduzido no início do dia e no final da tarde devido aos maiores ângulos de incidência dos raios solares sobre a superfície coletora, ocasionando perdas por sombras e bloqueios. Outra maneira de orientar os coletores é com eixo norte-sul, com rastreamento do Sol no sentido leste-oeste. De acordo com Kalogirou (2009), essa configuração tem os maiores ângulos de incidência durante o meio-dia e, conseqüentemente, maiores perdas ópticas do que se observa no início da manhã e fim de tarde.

2.3.2 Torre solar

Torre solar, também chamada de receptor central, é uma tecnologia que está sendo desenvolvida nos EUA desde os anos 70 quando o conceito foi proposto pela primeira vez. Devido às elevadas temperaturas de operação, a torre solar tem potencial para atingir eficiências mais altas e os sistemas de armazenamento térmicos podem operar com custos menores se comparados com a tecnologia de calha parabólica (KALOGIROU, 2009).

Plantas tipo torre solar usam heliostatos, que são refletores que giram em torno dos eixos azimutal e de elevação, para refletir a radiação solar em um receptor central localizado no alto de uma torre. A radiação solar aquece um fluido (sal fundido, óleo, etc.) no receptor e o fluido

é bombeado para a base da torre onde gera vapor. A Fig. (2.4) mostra a planta *SolarTwo*, localizada nos EUA.



Figura 2.4 Planta solar tipo torre central SolarTwo, localizada nos EUA.

Fonte: SOLARPACES (2012).

A torre central da *SolarTwo* tem altura de 91,4 m, com o receptor localizado no seu topo. O campo de heliostatos consiste em 1.818 heliostatos com 39,3 m² de área refletora cada um. A *SolarTwo* alcançou a maioria dos seus objetivos, comprovando a viabilidade da geração de eletricidade com um sistema de torre central com temperaturas entre 500 °C a 1500 °C.

Os dois principais conceitos tecnológicos de operação de plantas de receptor central são definidos pelo fluido de transferência de calor: vapor ou sal fundido. Nas plantas que utilizam vapor direto, os heliostatos refletem a radiação solar para o receptor na torre, que se assemelha a uma caldeira de uma planta convencional (KALOGIROU, 2009). A água de alimentação, bombeada do bloco de potência, é vaporizada e superaquecida no receptor e esse vapor movimenta uma turbina acoplada a um gerador para produzir eletricidade. A temperatura de operação desse tipo de planta varia de 250 °C até 550 °C. As características que deixam uma planta de receptor central com vapor direto mais atrativas são: projeto simples, uso de caldeira com tecnologia convencional, eficiência termodinâmica elevada e baixas perdas parasitas (energia consumida pela própria planta, como a eletricidade para as bombas do fluido de transferência de calor e para o sistema de rastreamento solar. Um esquema da configuração dessa planta é apresentada na Fig. (2.5).

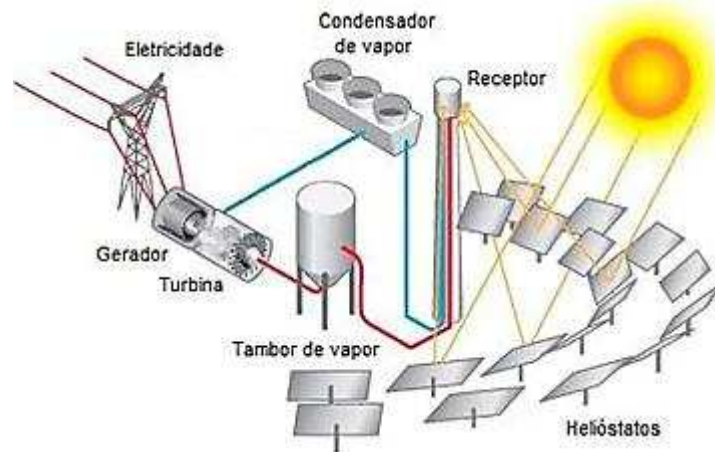


Figura 2.5 Esquema de planta solar tipo torre com uso de vapor.

Fonte: FOCUSOLAR (2012).

Em uma planta solar tipo torre operando com sal fundido, sal a uma temperatura de $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ é bombeado desde um tanque de armazenamento frio para o receptor, onde a radiação solar concentrada proveniente do campo de helióstatos aquece o sal até cerca de $565\text{ }^{\circ}\text{C}$ (KALOGIROU, 2009). O sal é tipicamente uma mistura de nitrato de sódio e de potássio e quando aquecido é mantido em um tanque de armazenamento quente. Quando a geração de energia elétrica é requerida, sal quente é bombeado ao gerador de vapor, que produz vapor a alta pressão em condições nominais de até $540\text{ }^{\circ}\text{C}$. O sal, já resfriado no gerador de vapor, retorna ao tanque de armazenamento frio para completar o ciclo. Devido à baixa pressão de vapor do sal, os dois tanques de armazenamento ficam sob pressão atmosférica. O vapor d'água é convertido em energia elétrica em um sistema convencional de turbina a vapor acoplada a um gerador elétrico, conforme Fig. (2.6).

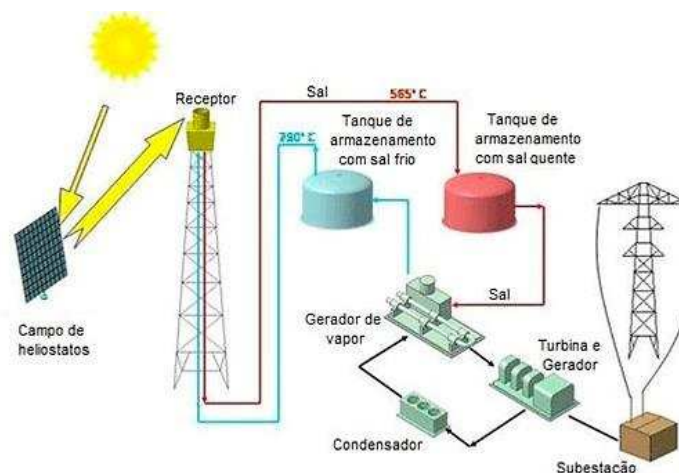


Figura 2.6 Esquema de uma planta solar tipo torre com uso de sal fundido.

Fonte: FOCUSOLAR (2012).

A combinação da massa específica e calor específico do sal com a diferença de temperatura entre os dois tanques viabiliza capacidades de armazenamento de até 15 horas. Assim como na tecnologia tipo calha parabólica, a escolha de torres de resfriamento úmida, seca ou híbrida influenciará no consumo de água da planta, desempenho do ciclo e custos.

2.3.3 Refletor Fresnel linear

A tecnologia de refletor Fresnel linear (LFR) tem configuração semelhante à da calha parabólica, com longas filas de coletores, com refletores planos ou com leve curvatura que refletem a radiação solar para um receptor linear suspenso. A ideia básica desse tipo de concentrador pode ser vista na Fig. (2.7), onde um refletor parabólico é cortado em tiras e essas tiras são alinhadas horizontalmente e cada uma delas segue o Sol individualmente. Pela observação da mesma figura, fica evidente que esses segmentos não fazem parte da mesma parábola, mas pertencem a parábolas com diferentes distâncias focais, aumentando em direção aos espelhos mais extremos.

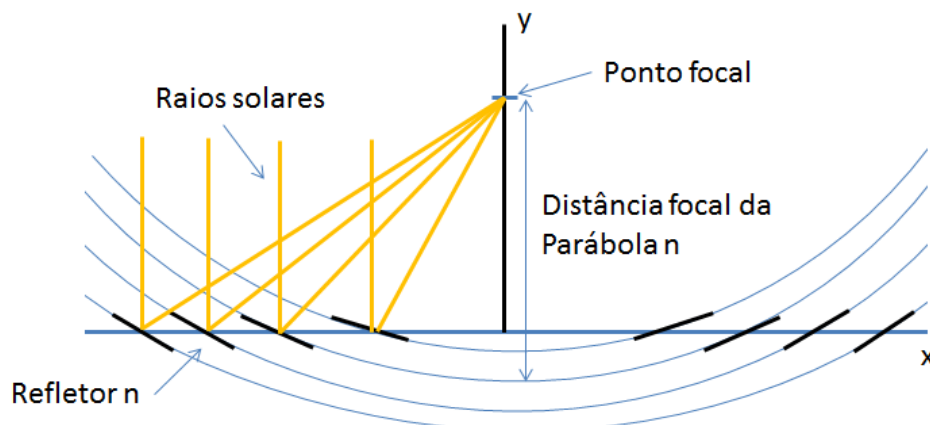


Figura 2.7 Refletores Fresnel ideais para o caso de irradiação direta perpendicular ao plano dos espelhos.

Fonte: HÄBERLE (2013).

Refletores planos e receptores fixos levam a custos menores em relação a uma planta CSP tipo calha parabólica tradicional. Além disso, os sistemas LFR são montados próximo ao solo, minimizando os requisitos estruturais. Em contrapartida, as plantas LFR são menos eficientes na conversão solar para eletricidade e é mais difícil adicionar um sistema de armazenamento térmico ao processo. Já existem plantas operando com geração direta de vapor superaquecido a 380 °C e há estudos para produção de vapor a 450 °C. Temperaturas de operação mais elevadas possibilitam uma maior eficiência do ciclo térmico. Como essa

tecnologia ainda está em fase de testes para seu desenvolvimento, o custo relativo da energia produzida, em comparação ao de calha parabólica, ainda não está bem estabelecido (CANAVARRO, 2010). Um esquema dessa tecnologia é apresentado na Fig. (2.8).

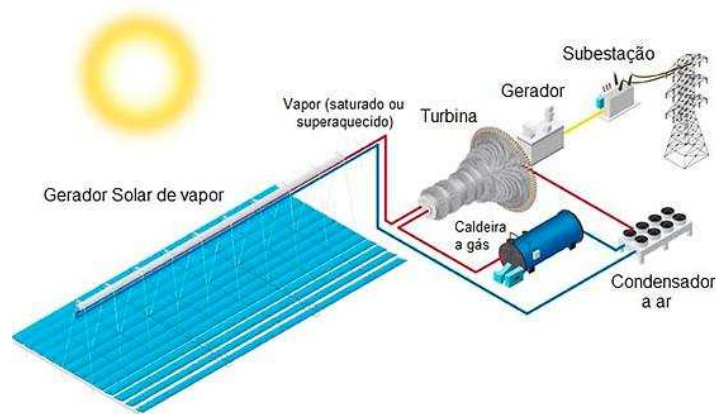


Figura 2.8 Esquema de uma planta com geração direta de vapor utilizando LFR.

Fonte: FOCUSOLAR (2012).

O rastreamento de eixo único usual da tecnologia LFR difere daquele utilizado na de calha parabólica, pois o refletor é composto de muitos segmentos longos, os quais focalizam a radiação solar no receptor linear suspenso paralelo ao eixo rotacional do refletor. Diferentemente dos refletores tipo calha parabólica, o receptor do LFR é fixo no espaço e os refletores giram para manter o foco no receptor. Na Fig. (2.9) é mostrada uma planta, construída em Calasparra, Espanha, pela Novatec. Essa planta possui 28 fileiras de refletores Fresnel lineares com potência elétrica nominal de 30 MW, em uma área de cerca de 80 hectares.



Figura 2.9 Planta LFR em Calasparra, Espanha.

Fonte: FOCUSOLAR (2012).

2.3.4 Prato parabólico

Nesta tecnologia o coletor rastreia o Sol em dois eixos, concentrando a energia solar em uma cavidade receptora no foco do prato. O receptor absorve a energia solar e a converte em energia térmica através do fluido circulante. A energia térmica pode ser convertida em eletricidade usando um motor/gerador acoplado diretamente ao receptor, ou pode ser transportada através de tubulações até um sistema central de conversão de potência.

A tecnologia CSP de prato parabólico permite a instalação de plantas em terrenos relativamente acidentados, com até 5% de inclinação, o que reduz o custo da preparação do local para novos projetos. O resfriamento desse sistema é por circuito fechado que, combinado com a ausência de um ciclo a vapor, confere a ele o menor uso de água por energia elétrica gerada entre todas as tecnologias CSP. Além disso, um sistema de prato parabólico registrou a maior eficiência na conversão solar para eletricidade, em torno de 31,4% (Tolmasquim, 2003). Porém, os sistemas de prato parabólico são os que possuem o menor grau de maturidade entre as tecnologias CSP.

Na Fig. (2.10) pode ser visto um esquema deste modelo.

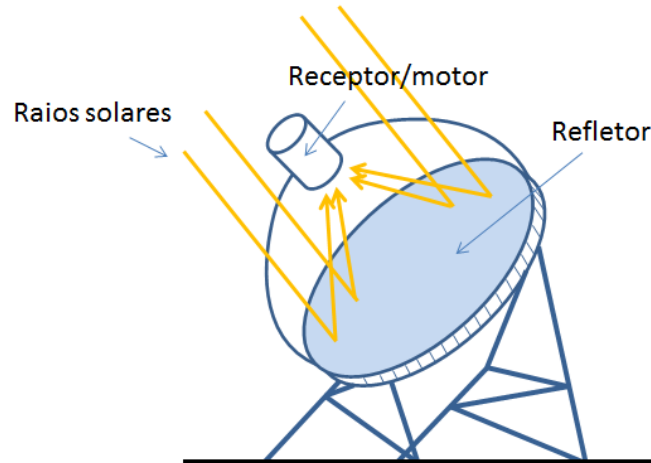


Figura 2.10 Esquema de concentrador tipo prato parabólico.

No sistema de prato parabólico, o motor térmico converte a energia térmica em energia mecânica de forma semelhante aos motores térmicos convencionais, ou seja, comprimindo um fluido de trabalho à baixa temperatura, aquecendo este fluido e expandindo, através de uma turbina ou de um pistão, para produzir trabalho (KALOGIROU, 2009). A energia mecânica produzida é então convertida em energia elétrica com o auxílio de um gerador.

Geralmente, o refletor é feito de prata ou alumínio depositado sob vidro. Esse tipo de coletor pode ser usado em aplicações de baixa potência, em áreas remotas.

Um dos primeiros exemplos de usina usando coletores discos parabólicos foi a de Maricopa Solar, no Arizona, EUA. A Fig. (2.11) mostra um detalhe dessa usina. Essa usina consiste de 60 coletores prato parabólico que aquecem o hidrogênio para acionar motores Stirling. A usina tem uma capacidade de 1,5 MW. Esta tecnologia não é comercialmente disponível para produção em larga escala de energia.



Figura 2.11 Detalhe de uma planta solar tipo disco parabólico, localizada no Arizona, EUA.

Fonte: FOCUSOLAR (2012).

2.3.5 Comparação entre tecnologias

Do ponto de vista comercial, as plantas que utilizam calhas parabólicas são as mais difundidas e com tecnologia mais madura, fazendo com que o risco de investimento na tecnologia seja minimizado por sua difusão.





O fato da tecnologia de LFR fazer uso de superfícies refletoras planas ou levemente curvadas ao invés de espelhos côncavos, faz com que o custo relacionado à aquisição dos coletores seja significativamente menor do que em plantas com calha parabólica. Este detalhe, atrelado a uma série de outros fatores estruturais, resulta em um custo por unidade de potência instalada inferior às demais tecnologias abordadas, fazendo com que os concentradores Fresnel lineares sejam os mais adequados para empregar nesta concepção. Por outro lado, devido às propriedades geométricas dos coletores solares em plantas LFR, a eficiência ótica de seu campo solar é menor, especialmente em períodos do início da manhã e do final da tarde.

Com cerca de 1,4 MW na Espanha, 5 MW na Austrália e uma nova usina de 30 MW, a Puerto Errado 2, na Espanha, que entrou em operação em setembro de 2012, mostra que esta tecnologia necessita de incentivos do governo para alcançar competitividade comercial. Nos

próximos anos, com os avanços da tecnologia e implantação de instalações de grande porte (isto é, de 100 a 250 MW), espera-se uma redução considerável no seu custo, podendo ser viável para competir com o carvão e gás antes de 2020 (IRENA, 2013).

Estes sistemas que foram citados possuem quatro características em comum: todos eles necessitam de um refletor, mecanismo de seguimento, receptor e de um fluido de trabalho que transporte e armazene o calor capturado, podendo ser à base de água, ar ou óleo. A Tab. (2.3) sintetiza as principais tecnologias mencionadas ao longo das seções anteriores, salientando as principais diferenças e apresentando o desempenho das diferentes tecnologias CSP.

Tabela 2.3 - Comparação do desempenho e parâmetros técnicos para tecnologias CSP.

	Fresnel Linear	Calha Parabólica	Disco Parabólico	Torre central
				
Receptor	Fixo	Móvel	Móvel	Fixo
Foco de concentração	Linear	Linear	Pontual	Pontual
Fluído de trabalho	Vapor ou óleo	Óleo sintético	Hidrogênio ou Hélio	Sais fundidos
Temperatura, °C	270 - 390	350 - 550	550 - 750	250 - 565
Rendimento global, %	8 - 10	10 - 16	25 - 30	20 - 35
Espaço ocupado	Médio	Grande	Pequeno	Médio
Consumo de água, L/MWh	3.000	3.000	Não consome	2.000
Armazenamento	Depende da planta	Sim	Depende da central	Sim
Potência, MW	15-200	15-200	0,003-0,025	15-150

Fonte: adaptado de KALOGIROU (2009).

2.4 RASTREAMENTO SOLAR

Para sistemas térmicos baseados na irradiação solar é importante a realização de um estudo de disponibilidade da fonte solar no local onde será instalada a tecnologia. Para o projeto de um LFR com rastreamento solar de eixo fixo, os cálculos dos ângulos são muito importantes, já que são necessários para maximizar a energia concentrada na cavidade do receptor,

umentando a eficiência térmica no sistema. O ângulo que está diretamente ligado com a eficiência é o ângulo de incidência. Para realizar este cálculo é necessário ter os seguintes parâmetros: ângulo horário (ω), ângulo de zênite (θ_z), declinação solar (δ), azimute solar (γ_s), ângulo de inclinação da superfície em relação ao plano horizontal (β) e o ângulo de azimute (γ).

Para tanto, é indispensável que haja uma maneira de rastrear a posição do Sol. Os métodos de rastreamento podem ser tanto com sistemas mecânicos quanto por sistemas eletrônicos. O rastreamento por sistema eletrônico funciona a partir de um algoritmo matemático que, em função da data, hora e coordenadas de latitude e longitude de onde está localizada a planta, calcula a posição do Sol. O mecanismo que irá realizar o rastreamento deve ser preciso, mantendo os aspectos de baixo custo que faz o LFR atraente em relação a outras tecnologias de CSP, mesmo em dias nublados intermitentes, devendo retornar à posição original ao fim do ciclo.

2.4.1 Tempo solar verdadeiro ou hora solar

O tempo solar verdadeiro está baseado no movimento angular aparente do Sol no céu, considerando o meio-dia solar a hora em que o Sol cruza o meridiano do observador. Tempo solar verdadeiro é o tempo utilizado em todas as relações geométricas Terra-Sol; ele não coincide com o horário oficial no local. É necessário converter a hora oficial para o tempo solar verdadeiro aplicando duas correções. Em primeiro lugar, existe uma constante de correção para a diferença de longitudes entre o meridiano do observador e o meridiano em que a hora local é baseada. O Sol leva quatro minutos para atravessar um grau de longitude. A segunda é a correção da equação do tempo, que leva em conta as perturbações na taxa de rotação da Terra que afeta o tempo que o Sol cruza o meridiano do observador. O tempo solar verdadeiro está relacionado com a hora oficial como mostrado na Eq. (2.1):

$$TSV = T_o \pm 4(L_{st} - L_{loc}) + E_t \quad (2.1)$$

onde T_o é a hora oficial, L_{st} é a longitude padrão, L_{loc} é a longitude local e E_t a equação do tempo. Deve ser notado que a correção de longitude é positiva se a longitude local está a leste da longitude padrão e negativa se está a oeste. A equação do tempo pode ser calculada pela Eq. (2.2), conforme Spencer (1971):

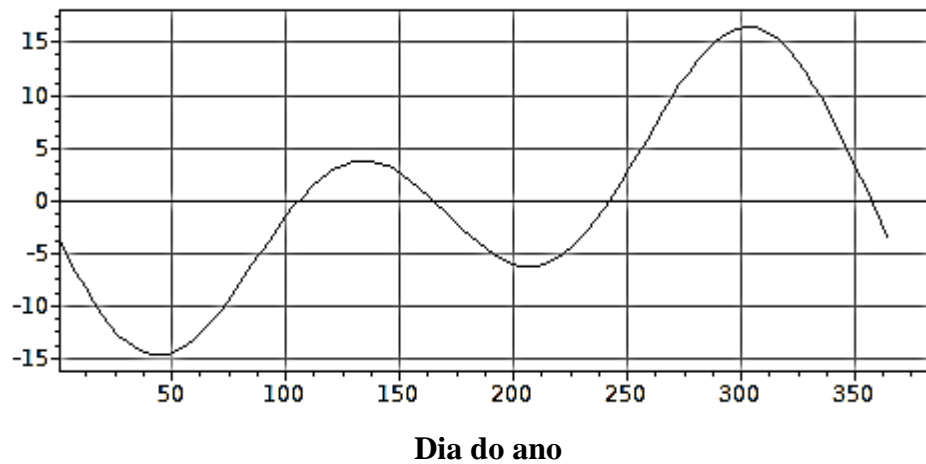
$$E_t = (E_1 + E_2 \cos(B) - E_3 \sin(B) - E_4 \cos(2B) - E_5 \sin(2B))(229,18) \quad (2.2)$$

sendo $E_1 = 0,0000075$; $E_2 = 0,001868$; $E_3 = 0,032077$; $E_4 = 0,014615$; $E_5 = 0,04089$. Na mesma equação, B é calculado pela Eq. (2.3):

$$B = \frac{360}{365}(n - 1) \quad (2.3)$$

onde n é o dia analisado, variando de 1 a 365.

O último termo da Eq. (2.3) é a conversão de radianos para minutos. A Fig. (2.12) mostra os valores da equação do tempo ao longo do ano.



2.4.2 Ângulo horário

O ângulo horário, ω , é definido como o deslocamento angular do Sol, leste ou oeste, em relação ao meridiano local, devido ao movimento de rotação da Terra em seu eixo, a uma taxa de 15° por hora. Por convenção, o ângulo horário é negativo durante as horas do período da manhã e positivo para as horas da tarde. O ângulo horário é determinado conforme a Eq. (2.4):

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (2.4)$$

onde TSV é o tempo solar verdadeiro.

2.4.3 Movimento da Terra ao redor se seu eixo

Uma forma de representação clássica do céu consiste em imaginar uma esfera com a Terra fixa no seu centro, tal como é mostrado na Fig. (2.13).

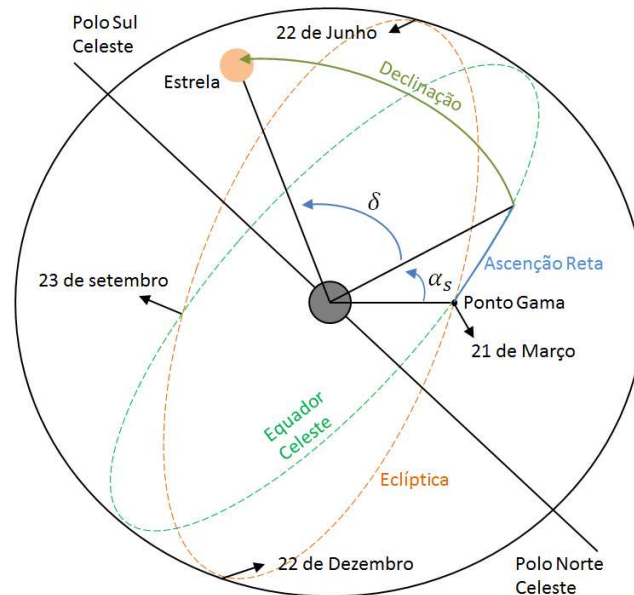


Figura 2.13 Caminho aparente do Sol e o ângulo de declinação solar.

A Terra tem seu eixo de rotação inclinado em $23,45^\circ$ em relação ao plano da eclíptica. Como consequência, a distribuição de energia em um dado local varia ao longo do ano em função dessa inclinação, tendo seu máximo no solstício de verão e o mínimo no solstício de inverno. Essas diferenças tendem a ser menos acentuadas em localidades com latitudes próximas à linha do equador (latitude 0°). Para locais onde as latitudes sejam acima de $56,5^\circ$ há disponibilidade de radiação solar por períodos muito mais longos no dia, nos solstícios de verão, embora a elevação do Sol, α_s , seja menor, causando maior dispersão da radiação solar pela camada atmosférica.

O movimento de rotação da Terra de oeste para leste causa uma aparente rotação na abóbada celeste em torno do mesmo eixo ao longo do dia, mas na direção contrária. Devido a esse movimento os maiores afastamentos são nos solstícios de verão e de inverno, onde atinge valores próximos ao da própria inclinação do eixo terrestre. A esse afastamento em relação ao ponto médio, dá-se o nome de declinação, que é dada pela Eq. (2.5), conforme Spencer (1971).

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi} \right) [0,006918 - 0,399912 \cos(B) + 0,070257 \text{sen}(B) - 0,006758 \cos(2B) + 0,000907 \text{sen}(2B) - 0,002697 \cos(3B) + 0,00148 \text{sen}(3B)] \quad (2.5)$$

onde B é calculado pela Eq. (2.3).

O ponto médio é alcançado nos equinócios e ocorre quando o plano da trajetória do Sol encontra-se no equador celeste, que nada mais é que a projeção celeste do equador terrestre, como mostrado na Fig.(2.14).

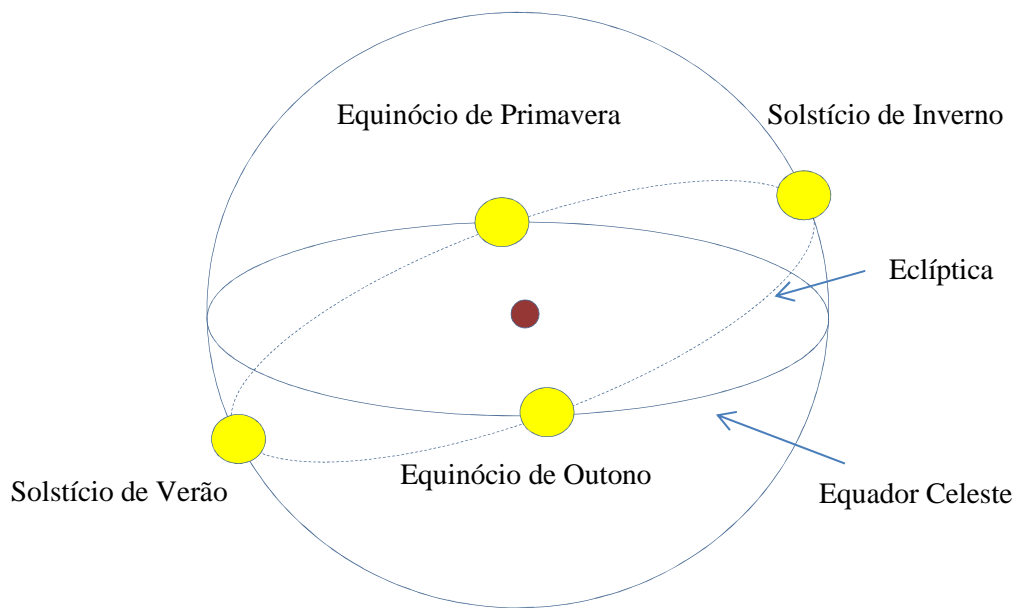


Figura 2.14 Representação mostrando a projeção do equador celeste. O ponto central da figura é a Terra.

A irradiância solar extraterrestre, em um plano normal à sua incidência, G_{on} , é função da distância Terra-Sol ao longo do ano e pode ser calculada pela Eq. (2.6), conforme Spencer (1971):

$$G_{on} = G_{sc} [1,000110 + 0,034221 \cos(B) + 0,001280 \text{sen}(B) + 0,000716 \cos(2B) + 0,000077 \text{sen}(2B)] \quad (2.6)$$

onde G_{sc} é o valor atribuído à irradiância no topo da atmosfera, chamada de constante solar, cujo valor comumente utilizado é igual a 1.367 Wm^{-2} .

A Fig. (2.15) ilustra graficamente a variação de G_{on} ao longo do ano em função do número do dia. Nota-se que o mínimo de irradiância no topo da atmosfera correspondente ao afélio terrestre que ocorre no meio do ano, mais precisamente no dia 4 de julho.

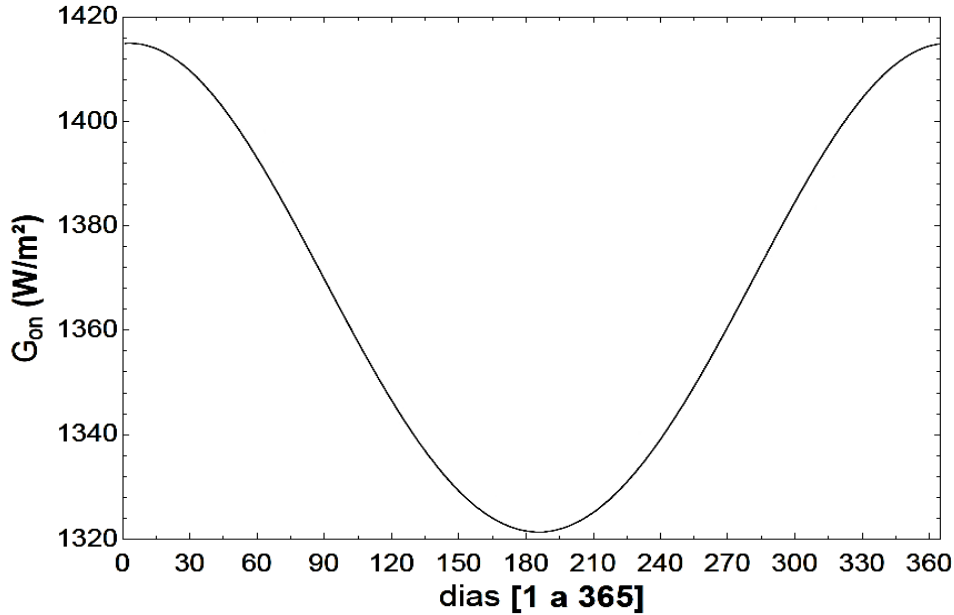


Figura 2.15 Variação anual de G_{on} em função do dia do ano.

A posição solar em relação à normal de uma superfície arbitrariamente orientada, θ_s , chamada de ângulo de incidência, é dada pela Eq. (2.7), de acordo com Duffie e Beckmann (2006).

$$\theta_s = \text{sen}^{-1}[\text{sen}(\delta)\text{sen}(\varphi)\cos(\beta) - \text{sen}(\delta)\cos(\varphi)\text{sen}(\beta)\cos(\gamma_s) + \cos(\delta)\cos(\varphi)\cos(\beta)\cos(\omega) + \cos(\delta)\text{sen}(\varphi)\text{sen}(\beta)\cos(\gamma_s)\cos(\omega) + \cos(\delta)\text{sen}(\beta)\text{sen}(\gamma_s)\text{sen}(\omega)] \quad (2.7)$$

onde β é a inclinação da superfície em relação ao plano horizontal ($0^\circ < \beta \leq 90^\circ$); δ é a declinação solar, isso é, a posição angular do Sol ao meio-dia solar em relação ao plano do equador ($-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$); φ é a latitude local, localização angular ao norte ou sul do equador ($-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ sendo sul negativo e norte positivo); γ_s é o ângulo para o qual a normal da superfície aponta em relação aos pontos cardeais (para o sul, 0° e norte 180°), ω é o ângulo horário.

Para uma dada posição geográfica e na ausência de uma atmosfera refrativa, as relações geométricas entre o Sol e uma superfície horizontal, θ_z , é dada pela Eq. (2.8), de acordo com Duffie e Beckmann (2006).

$$\theta_z = \cos^{-1}(\cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi) \quad (2.8)$$

onde θ_z é o ângulo de zênite.

A elevação solar α_s , é o ângulo entre o centro do Sol e o plano do horizonte visto por um observador, que pode ser calculado pela Eq. (2.9), de acordo com Duffie e Beckmann (2006).

$$\alpha_s = \sin^{-1}(\cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi) \quad (2.9)$$

A quantidade teórica de horas de céu claro disponível, N , varia dia a dia e é calculada pela Eq. (2.10).

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (2.10)$$

Para estimar o horário de nascer e pôr do Sol basta somar ou subtrair $N/2$, calculado pela Eq. (2.10), com 12, conforme mostram as Eq. (2.11), para nascer do Sol e Eq. (2.12), para o pôr do Sol.

$$SR = 12 - \frac{N}{2} \quad (2.11)$$

$$SS = 12 + \frac{N}{2} \quad (2.12)$$

A partir das Eq. (2.11) e (2.12), combinando-se com a Eq. (2.1), estimam-se os ângulos de nascer, Eq. (2.13) e pôr do Sol, Eq. (2.14).

$$\omega_{sr} = (SR - 12)15 \quad (2.13)$$

$$\omega_{ss} = (SS - 12)15 \quad (2.14)$$

2.4.4 Massa de ar

O cálculo da massa de ar é importante para a correta estimativa da quantidade de radiação solar incidente em uma superfície arbitrariamente inclinada. Basicamente, o valor da massa de ar varia com a elevação solar, tendo seu menor valor na máxima elevação solar, Sol no zênite.

A equação para o cálculo da massa de ar é dada pela Eq. (2.15), conforme Kasten e Young (1989).

$$m_r = \frac{1 - \frac{Z}{10^4}}{[\text{sen}\alpha_s^{true} + 0,50572(57,2957\alpha_s^{true} + 6,07995)^{-1,6364}]} \quad (2.15)$$

onde Z é a altitude, expressa em metros ($0 < Z < 4000$). O termo α_s^{true} corresponde ao desvio da elevação solar pela refração da radiação solar na atmosfera, como dado pela Eq. (2.16).

$$\alpha_s^{true} = \alpha_s + \Delta\alpha_{ref} \quad (2.16)$$

onde $\Delta\alpha_{ref}$ é calculado pela Eq. (2.17)

$$\Delta\alpha_{ref} = 0,061359 \frac{0,1594 + 1,1203\alpha_s + 0,06565\alpha_s^2}{1 + 28,9344\alpha_s + 277,397\alpha_s^2} \quad (2.17)$$

O termo α_s é a elevação solar, dada pela Eq. (2.9).

2.4.5 Modelo de radiação de céu claro - ESRA

O Modelo de ESRA, European Solar Radiation Atlas, elaborado por Wald et al. (1999), apud Rigollier et al. (2000), é o modelo de céu claro mais usado atualmente. Além da elevação solar, depende também dos coeficientes de turbidez de Linke para a localidade. A curva característica de radiação de céu claro é semelhante a uma parábola, com máximo ao meio-dia solar local, como mostra a Fig. (2.16).

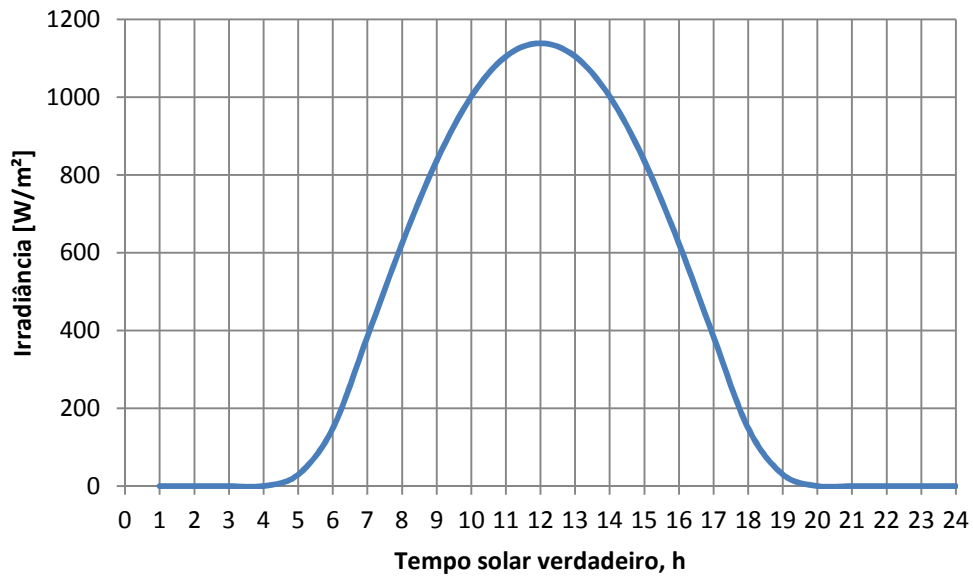


Figura 2.16 Curva típica da irradiância de um dia céu claro.

A radiação solar, porém, sofre variação não somente por consequência do movimento aparente do Sol. A atmosfera contribui significativamente para a absorção e espalhamento da radiação solar ao longo do dia e depende fortemente da quantidade de massa de ar entre o Sol e a superfície iluminada diretamente. A radiação solar tende a sofrer maior espalhamento à medida que o Sol se aproxima do horizonte.

A componente direta horizontal é obtida através da Eq. (2.18).

$$G_b = G_{on} \text{sen} \alpha_s e^{-0,8662 T_L m_r \delta_r} \quad (2.18)$$

onde m_r é a massa de ar, calculada pela Eq. (2.15) e δ_r a profundidade óptica de Kasten Rayleigh, calculada pela Eq. (2.19), para $m_r \leq 20$, e T_L é o coeficiente de turbidez de Linke.

$$\delta_r = 1/[6,5567 + 1,75130m_r - 0,12020m_r^2 + 0,00650m_r^3 - 0,00013m_r^4] \quad (2.19)$$

A componente difusa é obtida através da Eq. (2.20).

$$G_d = G_{on} F_d(\gamma_s) T_n(T_L) \quad (2.20)$$

onde F_d é a função angular difusa, dependente da elevação solar α_s , e T_n é a função de transmissão difusa, dependente do coeficiente de turbidez de Linke, T_L . T_n e F_d são obtidos, respectivamente, pelas Eq. (2.21) e (2.22).

$$T_n(T_L) = -0,015843 + 0,030543T_L + 0,0003797T_L^2 \quad (2.21)$$

$$F_d(\gamma_s) = A_0 + A_1 \text{sen} \alpha_s + A_2 \text{sen}^2 \alpha_s \quad (2.22)$$

onde A_0 , A_1 e A_2 são calculados pelas Eq. (2.23), (2.24) e (2.25), respectivamente.

$$A_0 = 0,26463 - 0,061581T_L + 0,0031408T_L^2 \quad (2.23)$$

Para valores de $T_L > 6$, A_0 retorna valores negativos. Para isso, é utilizada a seguinte condição:

$$\text{se } A_0 T_n(T_L) < 0,0022 \text{ então } A_0 = 0,0022/T_n(T_L)$$

$$A_1 = 2,04020 + 0,018945T_L - 0,011161T_L^2 \quad (2.24)$$

$$A_2 = -1,3025 + 0,039231T_L - 0,0085079T_L^2 \quad (2.25)$$

2.4.6 Coeficiente de Turbidez de Linke

O método mais empregado para representar a atenuação atmosférica aos raios solares é através do coeficiente de Turbidez de Linke, T_L , o qual representa a turbidez atmosférica causada por aerossóis e vapor d'água, indicando o número de atmosferas secas e limpas que seriam necessárias para obter a mesma atenuação (DAL PAI, ESCOBEDO E ASSUNÇÃO, 2002).

Para as estimativas de céu claro na região de Porto Alegre, foi necessário obter esses coeficientes. Para isso, utilizou-se o método de Karayel et al. (1984), que é dado de acordo com a Eq. (2.26).

$$T_L = \frac{\ln\left(\frac{G_{sc}}{G_b}\right)}{m_r \delta_r} \quad (2.26)$$

onde G_{sc} é a constante solar, G_b é a radiação direta na horizontal, m_r é a massa de ar, calculada pela Eq. (2.15) e δ_r a espessura óptica de Kasten – Rayleigh, calculada pela Eq. (2.19). É

importante frisar que, como esses coeficientes são estimativas locais, é necessário que haja algum dado de entrada. Neste caso, G_b é o dado de entrada e foi obtido do Ano Meteorológico Típico (AMT) para a região de Porto Alegre, RS. Karayel et al. (1984) sugerem ainda a seguinte condição para os valores de G_b :

$$G_b \geq 200 \text{ W/m}^2 \quad (2.27)$$

Na depuração dos dados para a aplicação do modelo foi adotado o critério de corte para céu aberto proposto por Karayel et al. (1984), onde a irradiância direta na incidência normal deve ser maior que 200 W/m^2 e a razão entre a irradiância difusa pela global menor que $1/3$. Este método deve ser aplicado em dias completamente ensolarados.

3 ASPECTOS GEOMÉTRICOS DO LFR

Em sistemas de energia solar térmica operando com elevadas temperaturas, há necessidade de concentrar a radiação solar sobre uma área reduzida, chamada de área focal, aumentando assim o fluxo de radiação. Uma maneira de aumentar a concentração é através da utilização de lentes ou espelhos, que focam a radiação solar sobre um absorvedor, transferindo calor para um fluido de trabalho.

Especificamente em relação ao refletor Fresnel linear, a radiação solar direta incide em um conjunto de espelhos, planos ou com leve curvatura, que devem se movimentar continuamente de forma a refletir a radiação direta para um absorvedor, situada a uma determinada altura em relação ao plano dos espelhos. Para uma condição em que o Sol se encontra exatamente ao meio dia solar, a Fig. (3.5) mostra a posição de cada espelho para que os raios provenientes do Sol sejam refletidos para o plano do absorvedor.

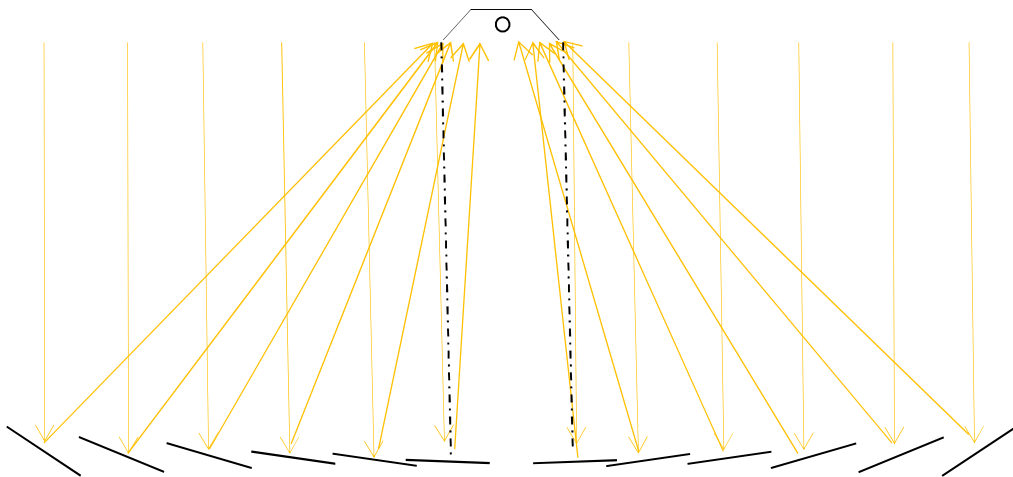


Figura 3.1 Representação da posição dos espelhos e do absorvedor em um LFR.

Assim, nesse capítulo, serão apresentadas as relações necessárias que possibilitam o estudo dos efeitos dos diversos parâmetros construtivos do refletor, tais como altura e largura do absorvedor, número e largura dos espelhos e o espaçamento entre os espelhos no seu desempenho térmico.

Para a estimativa da irradiação incidente no plano dos espelhos, optou-se por utilizar um modelo semi-teórico, chamado de modelo de céu claro, em lugar de utilizar dados medidos de irradiação direta, cuja disponibilidade no Brasil é reduzida. Esses modelos são amplamente utilizados para a simulação de sistemas de energia solar, controle de qualidade de dados medidos, processos de preenchimento de dados faltantes em bancos de dados de radiação solar e cálculos de carga térmica em edificações (GUEYMARD, 1993).

3.1 MODELAGEM DO CONCENTRADOR SOLAR

Na Fig. (3.2) é apresentado o sistema de coordenadas utilizado para o cálculo da inclinação dos espelhos em função da posição do Sol em um determinado instante. Considerando \mathbf{V} como o vetor Terra-Sol, sua posição instantânea em relação à normal a uma superfície horizontal é dada pelo ângulo de azimute, θ_z . A projeção desse vetor no plano paralelo ao eixo do concentrador define o ângulo de azimute solar, γ_s . A projeção do vetor \mathbf{V} em um sistema de coordenadas ortogonais, fornece então os três vetores:

$$V_x = V \sin \theta_z \cos \gamma_s \quad (3.1)$$

$$V_y = V \sin \theta_z \sin \gamma_s \quad (3.2)$$

$$V_z = V \cos \theta_z \quad (3.3)$$

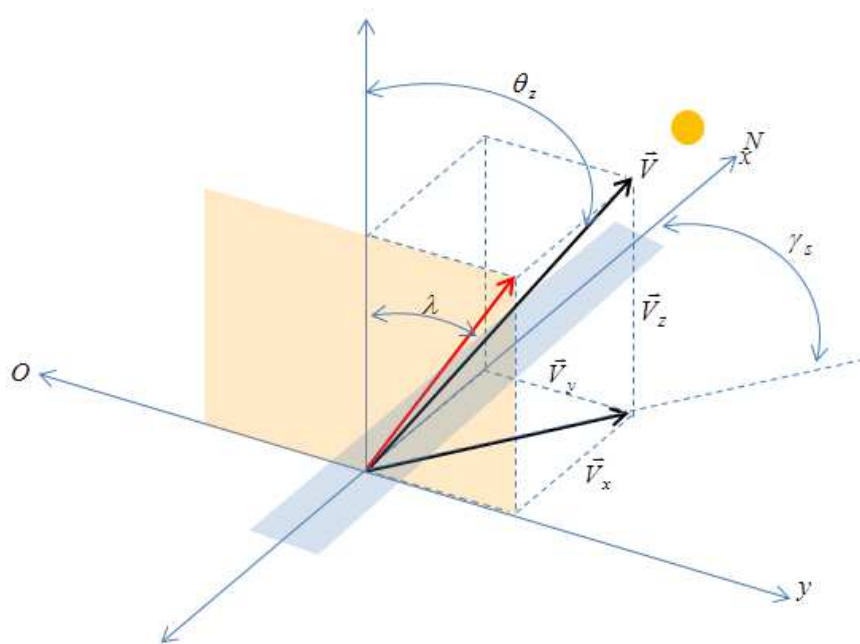


Figura 3.2 Sistema de coordenadas para os ângulos do Sol.

Para um concentrador Fresnel linear orientado norte-sul, com eixo horizontal, os espelhos devem movimentar-se seguindo o Sol na sua trajetória leste-oeste. Assim, o vetor \mathbf{V} é projetado em um plano transversal ao eixo dos espelhos e chamado de ângulo de incidência projetado, λ , calculado através da Eq. (3.4). Nessa análise, o ângulo longitudinal, formado pela projeção da posição do Sol no plano x-z e o eixo z, não é considerado uma vez que afeta apenas a radiação incidente nos finais de linha do absorvedor.

$$\tan \lambda = \frac{\sin \lambda}{\cos \lambda} = \frac{V_x}{V_z} = \frac{V \sin \theta_z \sin \gamma_s}{V \cos \theta_z} = \frac{\sin \theta_z \sin \gamma_s}{\cos \theta_z} \quad (3.4)$$

e então:

$$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta_z \sin \gamma_s}{\cos \theta_z} \right) \quad (3.5)$$

Na Fig. (3.3) é apresentado um corte transversal de um refletor Fresnel linear utilizando uma representação similar à utilizada por Mathur, Kandpal e Negi (1991) e Walker (2013). Nessa figura estão representados o ângulo de incidência projetado, λ , o ângulo formado pela linha vertical localizada no centro do absorvedor e o centro do espelho, φ_n , o ângulo de inclinação de cada espelho, θ_n , a distância entre o centro do espelho e o centro do refletor, Q_n , o deslocamento do espelho, S_n , que é a distância entre as extremidades de dois espelhos contíguos e a largura do espelho, W .

O método utilizado considera que a radiação direta proveniente do Sol atinja o centro do espelho, cuja inclinação a cada instante permite a reflexão dessa radiação para o centro do absorvedor, situado a uma altura H em relação ao plano contendo o eixo dos espelhos. No entanto, o Sol não é uma fonte pontual, uma vez que sua área subtende um ângulo sólido de aproximadamente $32'$. Assim, os efeitos de borda dos espelhos são corrigidos pela introdução do ângulo ξ_o , que é o semiângulo sólido do Sol.

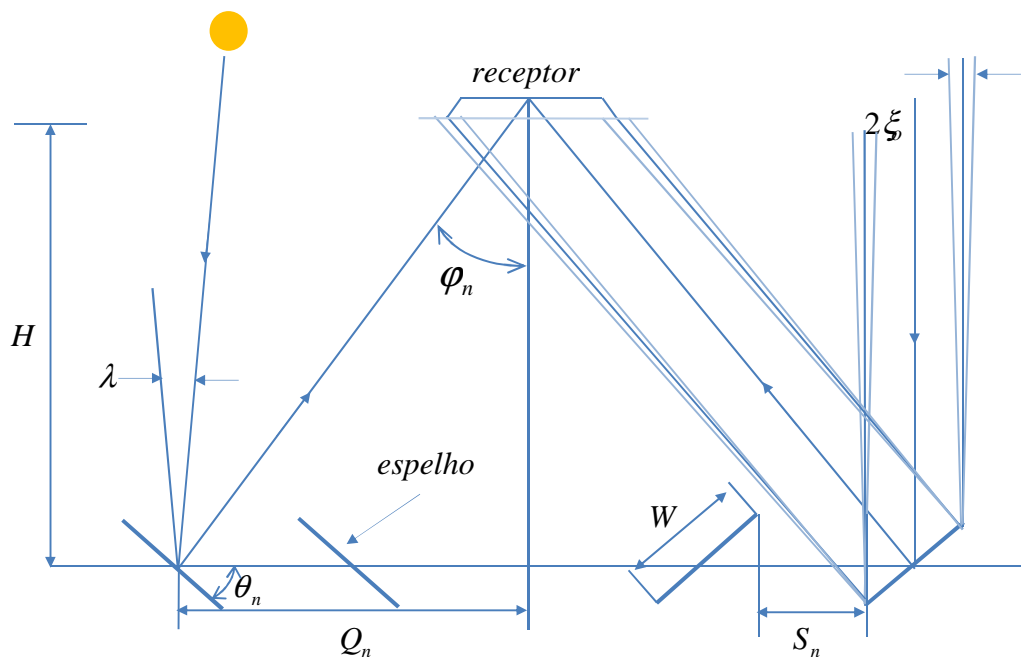


Figura 3.3 Sistema refletor Fresnel Linear e os ângulos de orientação.

Considerando a geometria mostrada na Fig. (3.4) e que o espelho seja um refletor perfeito para um raio proveniente do disco solar, considerado como um ponto e incidente na superfície do espelho com um ângulo ξ_n em relação à normal a essa superfície, o raio é refletido com o mesmo ângulo ξ_n de incidência, de acordo com a lei de Snell.

Para que esse raio atinja o plano do absorvedor, é necessário que o espelho esteja inclinado θ_n em relação à horizontal, para um espelho situado a uma distância Q_n do centro do coletor e um absorvedor situado em uma altura H do plano do eixo dos espelhos. Nessa condição, o ângulo de incidência no centro do absorvedor, φ_n , será dado pela Eq. (3.7) a partir da Eq. (3.6).

$$\tan \varphi_n = \frac{\text{sen} \varphi_n}{\text{cos} \varphi_n} = \frac{Q_n}{H} \quad (3.6)$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \left(\frac{Q_n}{H} \right) \quad (3.7)$$

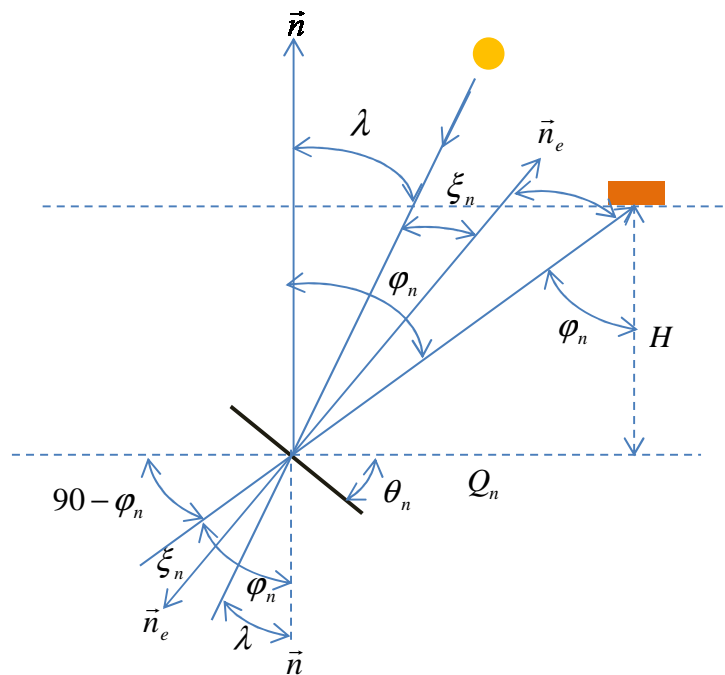


Figura 3.4 Ângulo de incidência da radiação solar no centro do absorvedor.

O ângulo de reflexão do espelho, ξ_n , é dado pela Eq. (3.9), a partir da Eq. (3.8).

$$\varphi_n = \lambda + 2\xi_n \quad (3.8)$$

e

$$\xi_n = \frac{\varphi_n - \lambda}{2} \quad (3.9)$$

Pela mesma figura, pode-se notar que o ângulo de inclinação do espelho n , é dado por θ_n , conforme Eq. (3.10).

$$\theta_n = \varphi_n - \xi_n = \varphi_n - \frac{\varphi_n - \lambda}{2} = \frac{\varphi_n + \lambda}{2} \quad (3.10)$$

Pode ser observado a partir dessas equações que cada espelho terá uma inclinação diferente, aumentando a partir do espelho central em direção às extremidades do coletor, cuja variação do ângulo de inclinação é igual para todos os espelhos. Essa observação é importante, pois permite que seja utilizado apenas um motor central para movimentar todo conjunto através de um mecanismo adequado para transferir esse movimento.

3.1.1 Distância entre espelhos

A distância entre os espelhos está relacionada, principalmente, com o sombreamento entre espelhos adjacentes que pode ocorrer em função da posição do Sol. Então, uma distância maior entre os espelhos garante a ausência de sombreamento, mas em compensação ocorre uma maior dispersão da radiação refletida devido ao efeito das bordas, principalmente para os espelhos mais afastados da posição central. Isso resulta em uma quantidade menor de energia recebida por unidade de superfície. Entretanto, a diminuição do espaçamento entre espelhos garante uma precisão maior dos raios refletidos no ponto focal, logo, a quantidade de energia recebida por unidade de superfície é maior. Por outro lado leva o sistema a um sombreamento indesejável nos espelhos. A Fig. (3.5) mostra a relação de sombreamento com espaçamento entre os espelhos. Na figura, o traço mais escuro representa a fração do espelho não sombreada pela posição do espelho adjacente, cujo resultado final é a redução da área útil.

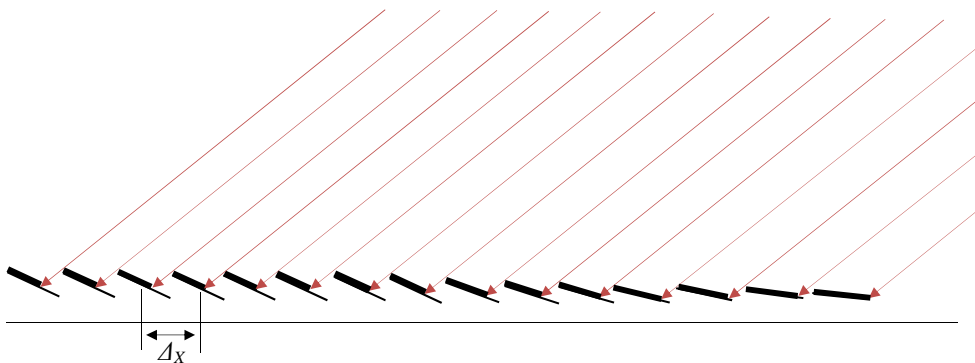


Figura 3.5 Espaçamento entre espelhos Δx e sombreamento entre espelhos adjacentes.

O sombreamento entre os espelhos depende da posição solar e do espaçamento entre eles, conforme apresentado na Fig. (3.6). Nessa figura, A_1 é a abertura total do espelho, perpendicular ao feixe de raios proveniente do Sol, A_2 é a abertura da parte não sombreada do espelho, L_1 e L_2 são vetores de sombra vs. interceptação e não sombreado vs. interceptação, respectivamente.

Pelo triângulo retângulo \overline{abc} , a abertura da parte sombreada, A_2 , pode ser obtida através da Eq. (3.11).

$$\text{sen}(\sigma) = \frac{A_2}{L_2} \Rightarrow A_2 = L_2 \text{sen}(\sigma) \quad (3.11)$$

onde o ângulo σ é calculado pela Eq. (3.12).

$$\sigma = (90 - \lambda) \quad (3.12)$$

Chamando de ψ o ângulo formado entre A_1 e o espelho, A_1 pode ser calculada através da Eq. (3.143).

$$A_1 = \frac{W}{2} \cos \psi \quad (3.13)$$

onde W é a largura do espelho e o ângulo ψ é calculado pela Eq. (3.14).

$$\psi = 90 - \lambda + \theta_n \quad (3.14)$$

Substituindo a Eq. (3.14) em (3.13), a expressão para A_1 fica representada pela Eq. (3.15).

$$A_1 = \frac{W}{2} \cos(90 - \lambda + \theta_n) \quad (3.15)$$

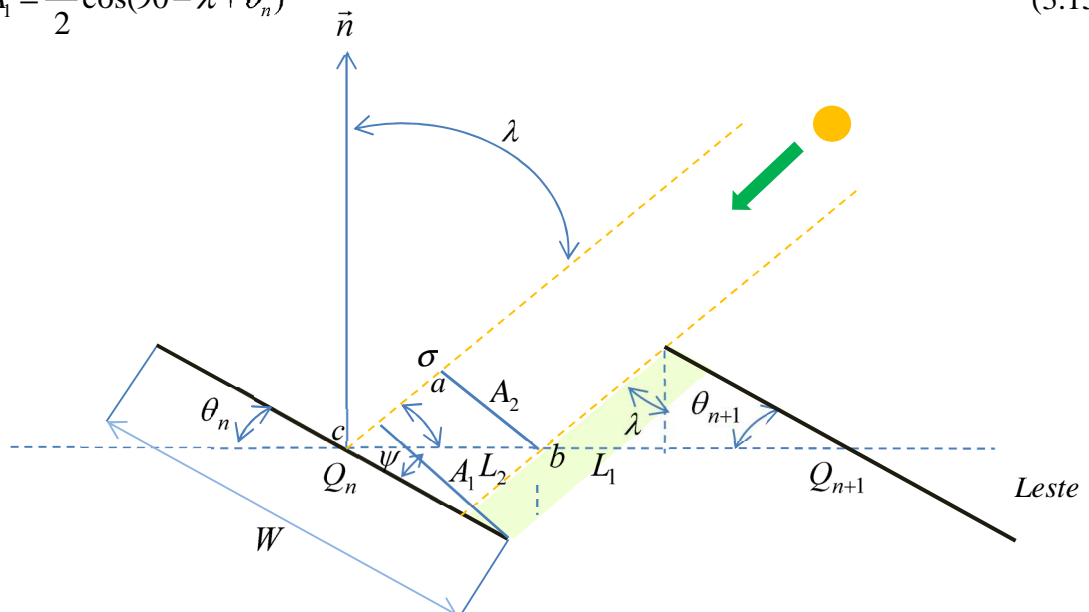


Figura 3.6 Representação das perdas por sombreamento entre os espelhos.

Considerando dois espelhos adjacentes, representados pela posição de seus centros como Q_n e Q_{n+1} , conforme a Fig. (3.7), o comprimento dos vetores de sombra e de não sombreamento pode ser calculado.

O vetor L_1 é calculado utilizando o triângulo retângulo representado na Fig. (3.11), conforme a Eq. (3.16).

$$\tan \lambda = \frac{L_1}{\frac{W}{2} \sin(\theta_{n+1})} \Rightarrow L_1 = \tan \lambda \sin \theta_{n+1} \frac{W}{2} \quad (3.16)$$

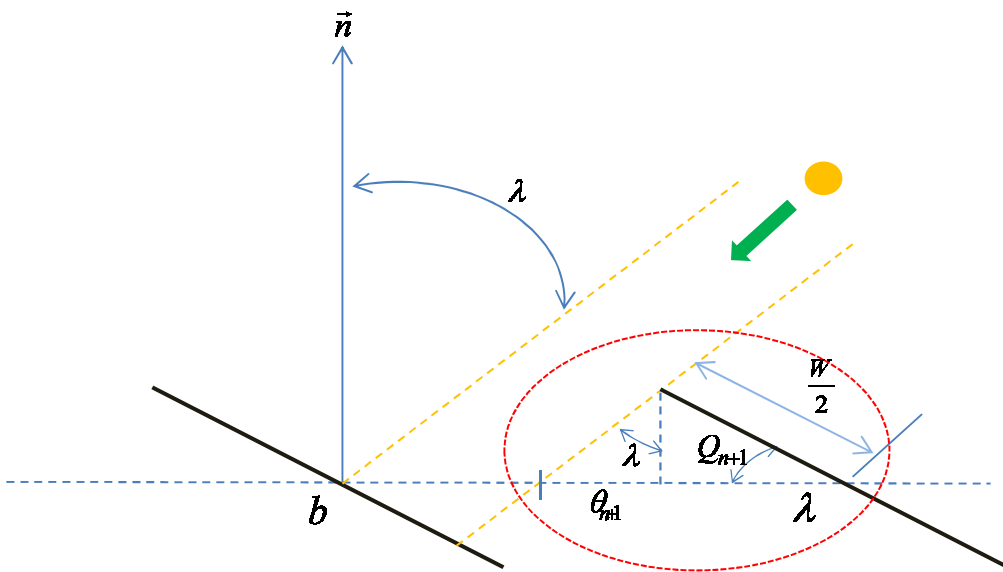


Figura 3.7 Representação da geometria dos espelhos para o cálculo de L_1 .

Utilizando a Fig. (3.8), o comprimento do vetor L_2 pode ser calculado, conforme a Eq. (3.17).

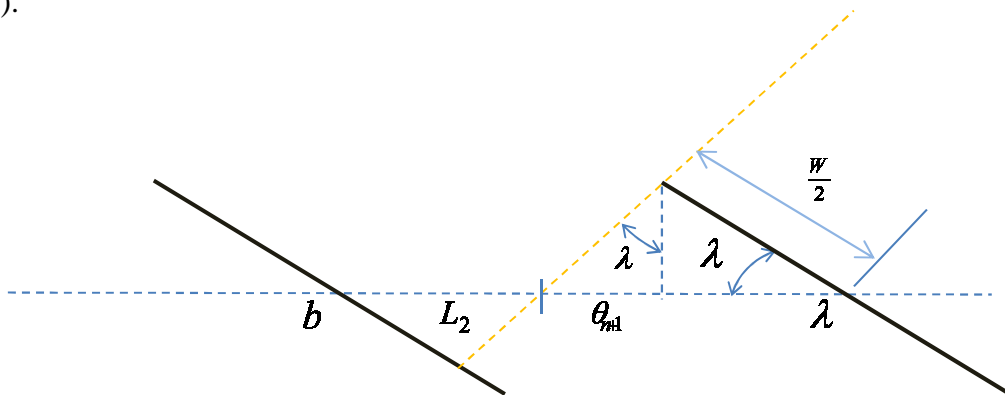


Figura 3.8 Representação da geometria dos espelhos para o cálculo de L_2 .

$$Q_{n+1} - Q_n = L_2 + L_1 + \left(\frac{W}{2} \cos \theta_{n+1} \right) \Rightarrow L_2 = Q_{n+1} - Q_n - L_1 - \left(\frac{W}{2} \cos \theta_{n+1} \right) \quad (3.17)$$

Substituindo a Eq. (3.16) na Eq. (3.17) e depois a Eq. (3.17) na Eq. (3.11), a expressão para A_2 fica dada pela Eq. (3.18).

$$A_2 = \left[Q_{n+1} - Q_n - \left(\tan \lambda \sin \theta_{n+1} \frac{W}{2} \right) - \left(\frac{W}{2} \cos \theta_{n+1} \right) \right] \sin(90 - \lambda) \quad (3.18)$$

3.1.2 Altura do receptor

Outro tipo de perda óptica apresentada pelo refletor Fresnel linear é a perda por bloqueio. Isso acontece quando a radiação refletida por um espelho incide na parte posterior do espelho adjacente, não atingindo o absorvedor. A altura do receptor tem efeito significativo sobre a produção de energia do coletor. Ao aumentar a altura do receptor, as perdas por bloqueio diminuem e a radiação solar incidente no plano de abertura do absorvedor aumenta, atingindo um valor máximo e depois, gradualmente, reduz. Esse comportamento ocorre porque uma vez que a altura aumenta acima de um valor ideal, o feixe refletido continua a divergir até a abertura do receptor não receber todo o fluxo, causando problemas na concentração focal. Por outro lado, uma menor altura causa o bloqueio do trajeto dos raios solares refletidos pelos espelhos que estão mais afastados. A Fig. (3.9) mostra simplificada o efeito do bloqueio por espelhos adjacentes.

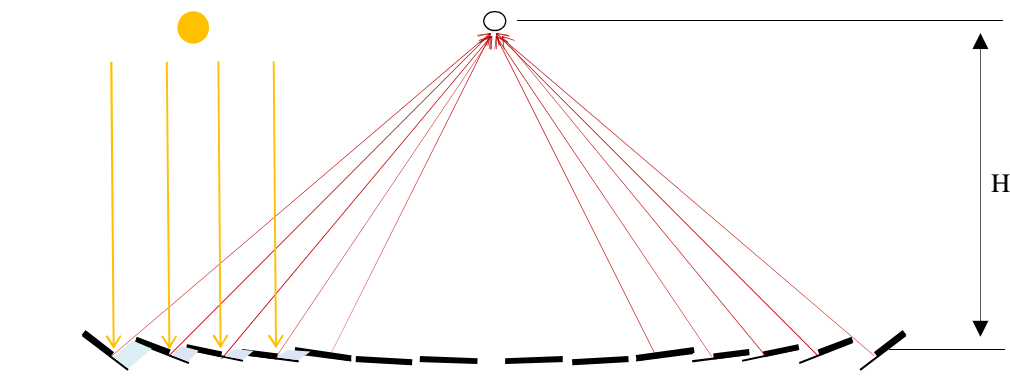


Figura 3.9 Altura do receptor, H, e as perdas por bloqueio nos espelhos.

As perdas por bloqueio podem ser determinadas de forma similar às perdas por sombreamento. Para isso, considera-se como referência as coordenadas mostradas na Fig. (3.10).

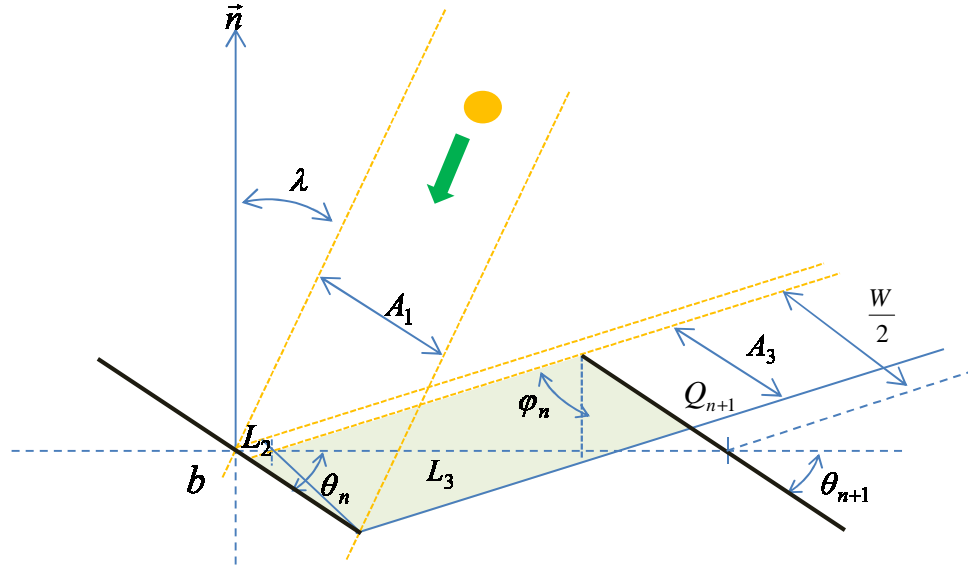


Figura 3.10 Geometria dos espelhos para o cálculo das perdas por bloqueio.

Considerando A_1 como a abertura não sombreada do espelho Q_n , a fração dessa abertura bloqueada pelo espelho Q_{n+1} será dada por A_3 . Utilizando a Fig. (3.14), o comprimento do vetor L_2 pode ser calculado conforme a Eq. (3.19).

$$Q_{n+1} - Q_n = L_2 + L_3 + \frac{W}{2} \cos \theta_{n+1} \Rightarrow L_2 = Q_{n+1} - Q_n - L_3 - \left(\frac{W}{2} \cos \theta_{n+1} \right) \quad (3.19)$$

O comprimento do vetor L_3 é calculado conforme a Eq. (3.20):

$$\tan \varphi = \frac{L_3}{\frac{W}{2} \sin(\theta_{n+1})} \Rightarrow L_3 = \tan \varphi \sin \theta_{n+1} \frac{W}{2} \quad (3.20)$$

A abertura da parte bloqueada é obtida pela Eq. (3.21),

$$\text{sen}(90 - \varphi + \theta_n) = \frac{L_2}{A_3} \Rightarrow A_3 = \frac{L_2}{\text{sen}(90 - \varphi + \theta_n)} \quad (3.21)$$

Substituindo a Eq. (3.20) na Eq. (3.19) e depois a Eq. (3.19) na Eq. (3.21), a expressão para A_3 fica dada pela Eq. (3.22).

$$A_3 = \frac{\left[Q_{n+1} - Q_n - \left(\tan \varphi \sin \theta_{n+1} \frac{W}{2} \right) - \left(\frac{W}{2} \cos \theta_{n+1} \right) \right]}{\sin(90 - \varphi_n + \theta_n)} \quad (3.22)$$

3.1.3 Propriedades ópticas do refletor Fresnel Linear

Quando a radiação atinge uma superfície, parte dessa radiação é refletida, parte é absorvida e, se o material for transparente, parte é transmitida.

A fração da radiação incidente que é refletida é definida como refletividade, ρ ; a fração absorvida como absorvidade, α , a fração transmitida como a transmissividade, τ e a fração da radiação refletida que é interceptada pelo absorvedor, γ .

Há dois tipos de reflexão de radiação: a reflexão direta e a reflexão difusa. Reflexão direta é aquela em que o feixe refletido faz com a normal à superfície um ângulo igual ao do feixe de radiação incidente. A reflexão difusa é aquela em que a radiação refletida é distribuída uniformemente em todas as direções, conforme esquema mostrado na Fig.(3.11).

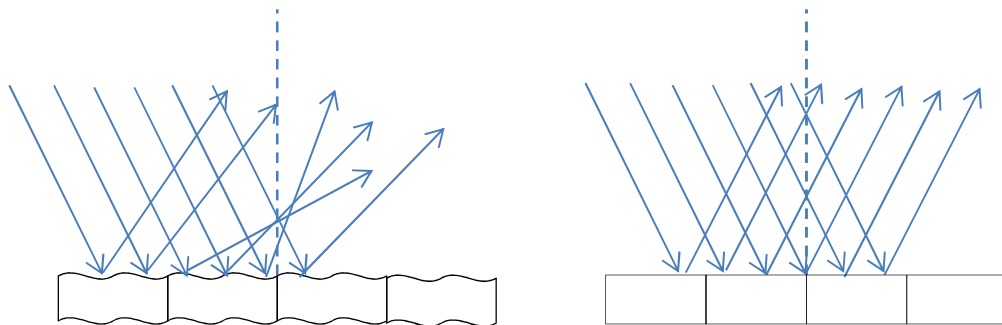


Figura 3.11 Reflexão difusa e Reflexão direta

No caso de um refletor Fresnel linear, além dos espelhos, dois outros elementos apresentam características ópticas importantes: o concentrador secundário e o absorvedor. O concentrador secundário pode ser construído de diversas formas: como efetivamente um concentrador, refletindo a radiação incidente na sua abertura para o absorvedor, localizado no seu ponto focal ou construído de forma plana, com um número elevado de tubos absorvedores onde o efeito da reflexão interna é desprezível. Assim, definem-se dois parâmetros ópticos ligados ao receptor. O fator de interceptação, definido como a fração da radiação refletida que é interceptada pelo absorvedor e o fator de reflexão da cavidade.

De uma maneira genérica, a potência térmica absorvida pelo absorvedor, E_f , pode ser estimada conforme a Eq. (3.23):

$$E_f = (A_c - A_b - A_s - A_{po})I\rho\gamma\tau\alpha \quad (3.23)$$

onde A_c é a área de reflexão (obtida pela área dos espelhos menos a área de sombra do receptor), A_b é a área dos espelhos bloqueados pelos espelhos adjacentes, A_s é a área sombreada dos espelhos, A_{po} é a área de perda óptica no receptor e I é a irradiância solar direta incidente no plano normal do coletor.

Na Tab. (3.1) são apresentados valores médios das características ópticas de um refletor Fresnel linear, conforme VELAZQUEZ (2009).

Tabela 3.1 - Parâmetros ópticos usados no coletor LFR.

Propriedade	Valores médios
ρ	$0,94 \pm 0,02$
γ	0,97
τ	0,90
α	0,96

3.1.4 Sombreamento do receptor

A sombra produzida pelo receptor sobre os espelhos ocorre em determinados ângulos de incidência do Sol, principalmente em horários próximos ao meio-dia solar onde a posição solar está mais próxima da normal do absorvedor. Nessa situação, o sombreamento acontece nos espelhos centrais do coletor. À medida que o Sol se afasta dessa posição, o efeito do sombreamento diminui, pois a sombra é projetada em direção às extremidades do campo de espelhos. A sombra do receptor pode ser calculada pela Eq. (3.24):

$$S_{rec} = \left(\frac{R_w}{2} + S \right) \quad 3.24$$

onde S_{rec} é a sombra do receptor projetado no campo dos espelhos, R_w é a largura do receptor em metros e o S é para corrigir o efeito de borda do receptor conforme Eq. (3.25).

$$S = \tan(\lambda + \xi_n) \quad 3.25$$

4 SIMULAÇÃO DO CONCENTRADOR LFR EM MATLAB

A influência dos diversos parâmetros geométricos do refletor Fresnel linear no seu desempenho térmico foi analisada teoricamente considerando a irradiância solar para dias de céu claro, utilizando o modelo de ESRA e para as condições descritas na Tab. (4.1). O local considerado para a localização do refletor foi a cidade de São Leopoldo, RS, com as coordenadas: latitude 29° 47'S e longitude 51° 9'W no horário de 12 horas (TVS). Para as simulações, as equações apresentadas no Capítulo 3 foram implementadas na plataforma MATLAB conforme apresentado no APÊNDICE A.

Tabela 4.1 - Períodos considerados para a análise do desempenho do LFR.

Data do ano		Irradiação, W/m ²
20 e 21 de março	Equinócio de outono	960,26
22 e 23 de junho	Solstício de inverno	582,82
22 e 23 de setembro	Equinócio de primavera	923,25
22 e 23 de dezembro	Solstício de verão	1138,81

4.1 POTÊNCIA INCIDENTE NO PLANO DE ABERTURA DO CONCENTRADOR

O modelo de simulação desenvolvido permite que as variáveis de entrada possam ser modificadas de acordo com as especificações do sistema LFR a ser analisado.

A metodologia considera que, para qualquer espelho n , o espelho é orientado de tal forma que o raio procedente do centro do disco solar é direcionado para o centro do espelho, refletindo para o centro do plano de abertura do concentrador secundário. Os raios de borda de entrada do espelho são divergentes devido ao ângulo subtendido do Sol, ξ_n , por isso é refletido sobre a horizontal da superfície abaixo do receptor. O fator de concentração do refletor Fresnel pode ser calculado pelas coordenadas refletidas em comparação com a abertura do feixe de entrada. Uma vez calculada a condição ideal, as perdas ópticas são então consideradas, como discutido na seção 3.1.3.

Os parâmetros de entrada utilizados na simulação do desempenho do refletor Fresnel incluem:

- Número de espelhos;
- Largura de cada espelho;
- Altura do receptor;
- Espaçamento entre os espelhos;
- Largura do receptor.

Na Fig. (4.1) é apresentado um detalhe do processo de simulação onde verifica-se que os raios concentram-se no receptor em três pontos distintos: um deles é na parte central, onde deverá estar posicionado o absorvedor enquanto os outros dois pontos representam os raios divergentes das extremidades dos espelhos e que deverão ser refletidos pelo concentrador secundário para o tubo absorvedor. Para as análises que serão apresentadas, foi usado um ângulo de incidência, λ , igual a zero, correspondente à posição do Sol no meio dia solar.

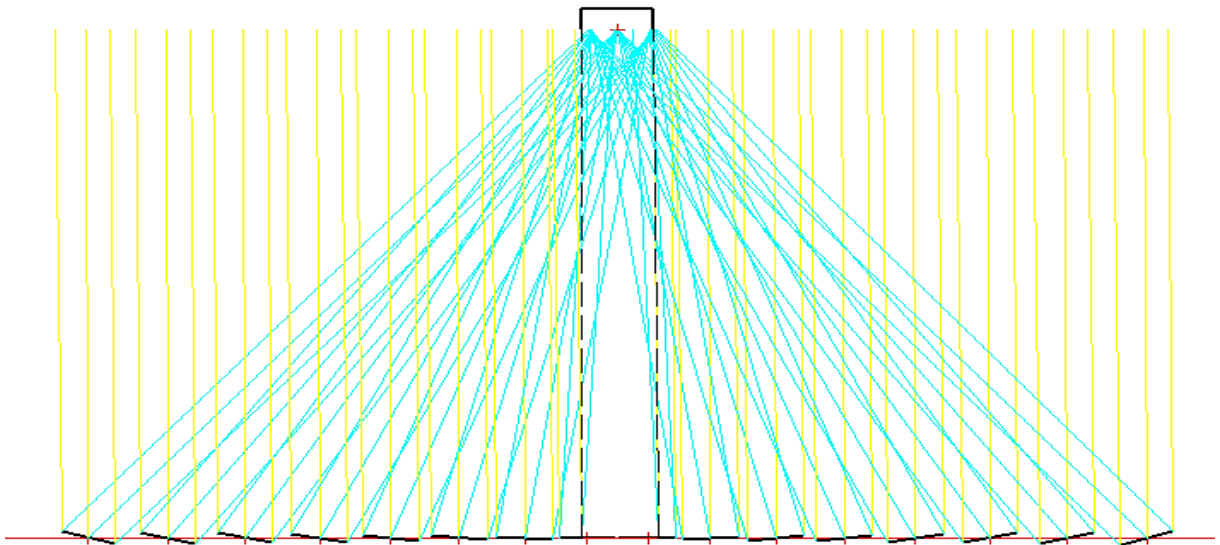


Figura 4.1 Modelo criado em MATLAB mostrando um sistema LFR.

Na Fig. (4.2) é apresentado, em forma de fluxograma, o processo de cálculo implementado no MATLAB para a determinação das condições geométricas do refletor Fresnel linear e o cálculo da potência incidente no plano de abertura do concentrador secundário.

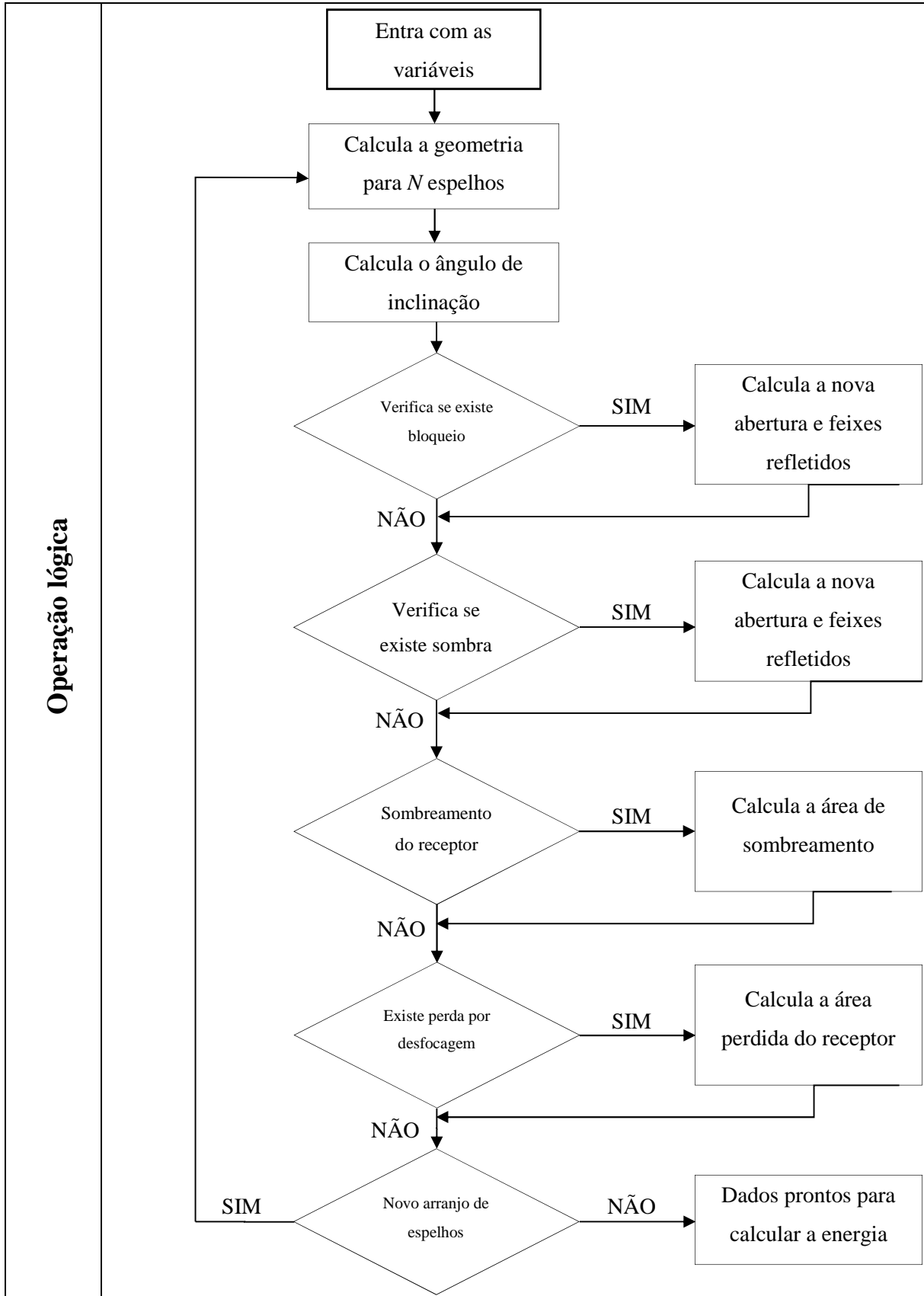


Figura 4.2 Modelo de fluxograma lógico do LFR – MATLAB.

4.1.1 Influência do número de espelhos

O efeito da alteração do número de espelhos na potência refletida para o receptor foi investigado e os valores escolhidos para os parâmetros de entrada no programa de simulação são mostrados na Tab. (4.2). Nas simulações, a largura dos espelhos e o tamanho do receptor foram modificados, permitindo que os raios divergentes refletidos fossem direcionados para o receptor.

Para essa análise, o valor do espaçamento entre espelhos e a altura do receptor em relação ao plano dos espelhos foram mantidos constantes para todos os casos.

Tabela 4.2 - Dados de entrada para a análise da influência do número de espelhos.

	Largura do espelho, m	Espaço entre espelhos, m	Altura do receptor, m	Largura do receptor, m
1	0,20	0,01	2,00	0,25
2	0,25	0,01	2,00	0,30
3	0,30	0,01	2,00	0,35
4	0,35	0,01	2,00	0,40
5	0,40	0,01	2,00	0,45
6	0,50	0,01	2,00	0,55

O número de espelhos para cada caso variou entre dois a trinta e dois, sendo que não houve restrição de espaço físico para compor a planta final de espelhos. Como já comentado anteriormente, todas as simulações utilizaram a mesma posição fixa do Sol, correspondendo a um ângulo horário onde $\lambda = 0^\circ$. Nas Fig. (4.3), (4.4), (4.5) e (4.6) são apresentadas as estimativas de potência incidente, por unidade de comprimento do absorvedor, no plano de abertura do concentrador secundário para cada um dos períodos do ano mostrados na Tab. (4.1). Pode-se notar que a potência aumenta com o número de espelhos. O aumento da potência cresce de forma linear para os primeiros espelhos que foram sendo adicionados, mas essa taxa cai quando a matriz de espelhos aumenta, assumindo um perfil assintótico.

Esse incremento é aproximadamente linear para larguras menores que 0,30 m. Para larguras maiores, principalmente acima de 0,35 m, existe a redução no aumento da potência devido aos espelhos adicionados estarem ainda mais distante do receptor, fazendo os feixes refletidos divergirem. Este problema também se agrava com as perdas ópticas por desfocagem no receptor e pelas perdas por bloqueio, que somam com o aumento da largura dos espelhos.

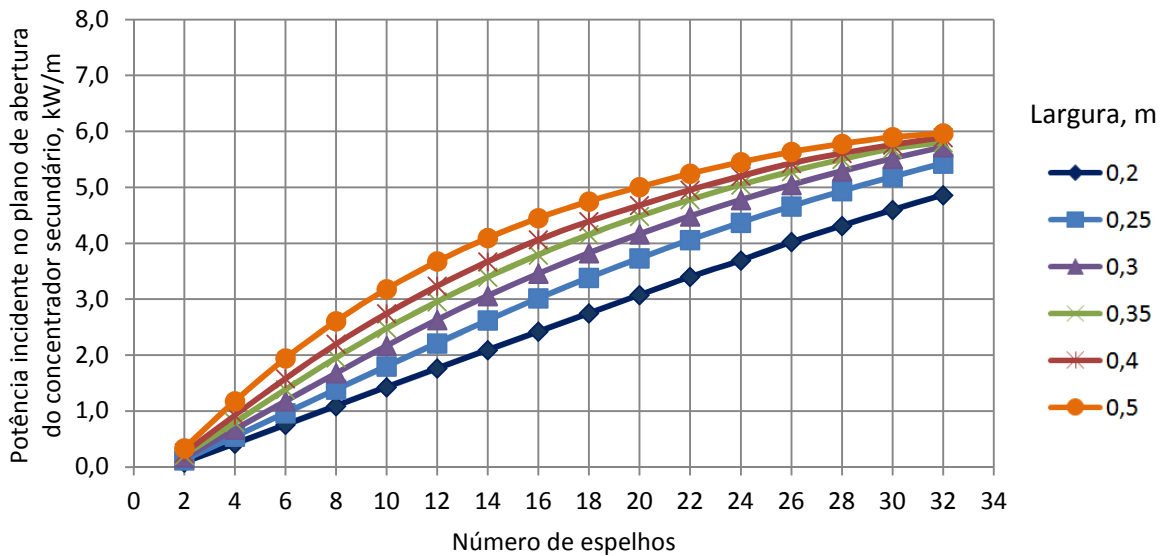


Figura 4.3 Estimativa da potência incidente no plano de abertura do concentrador secundário, no equinócio de outono.

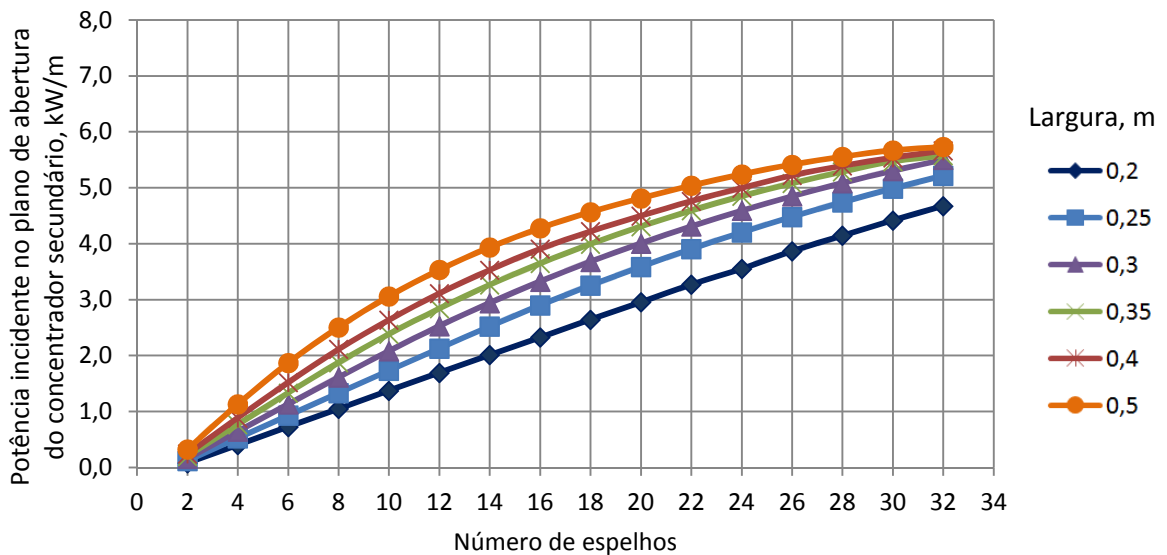


Figura 4.4 Estimativa da potência incidente no plano de abertura do concentrador secundário, no equinócio de primavera.

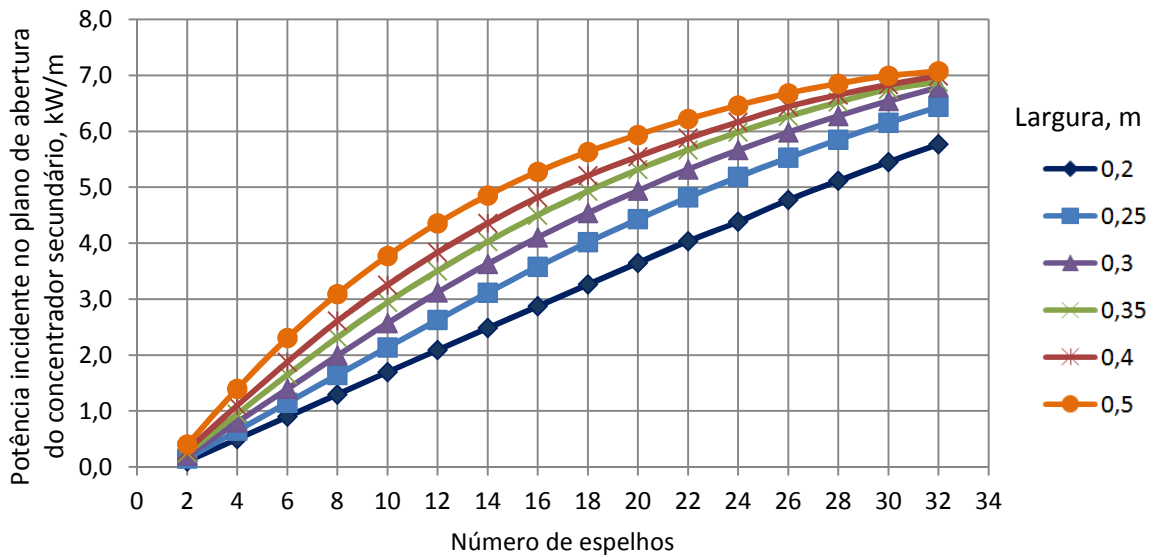


Figura 4.5 Estimativa da potência incidente no plano de abertura do concentrador secundário, no solstício de verão.

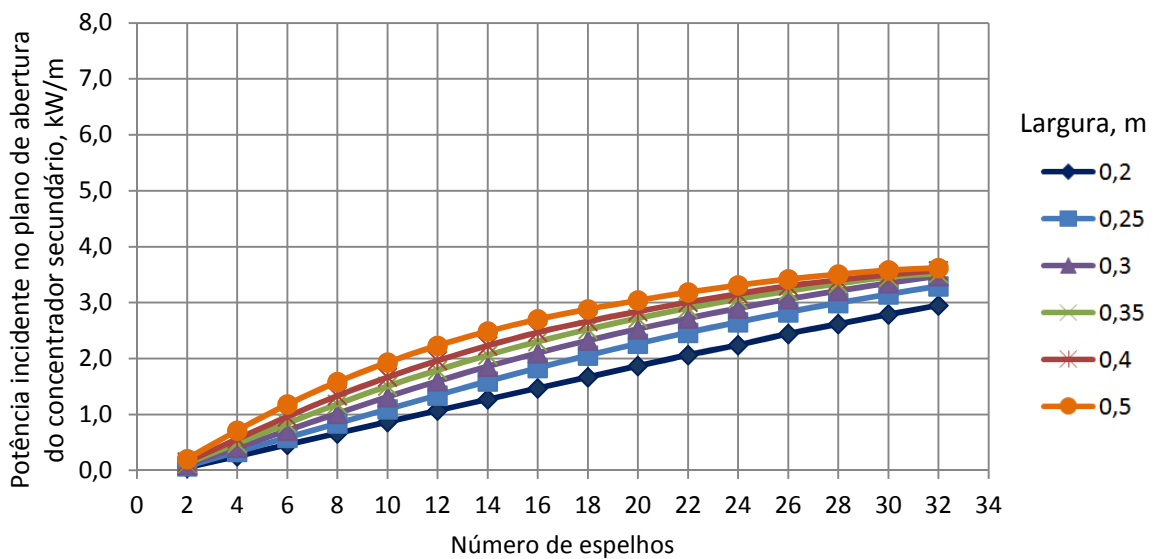


Figura 4.6 Estimativa da potência incidente no plano de abertura do concentrador secundário, no solstício de inverno.

Os resultados apresentados mostram que quanto maior for a largura e o número de espelhos, maiores serão as perdas por bloqueio, sombreamento e desfocagem no receptor, causando perda na potência entregue no receptor. Em relação à época do ano, a condição mais favorável é a do solstício de verão, como era esperado, uma vez que a posição do Sol é mais próxima da normal ao plano do refletor, diminuindo as perdas devido ao efeito cosseno. De forma similar, a pior situação será sempre durante o solstício de inverno.

Nas Fig. (4.7), (4.8), (4.9) e (4.10) o número de espelhos necessário para atingir, aproximadamente, a mesma quantidade de potência incidente no plano de abertura do concentrador secundário é apresentado como função da largura do espelho. Para este caso foi utilizada uma faixa estreita de potência incidente no plano secundário, assim, foi possível definir a quantidade de espelhos necessária para ter um resultado próximo para cada largura testada, mostrando que espelhos de diferentes larguras podem refletir para o concentrador secundário aproximadamente a mesma quantidade de potência.

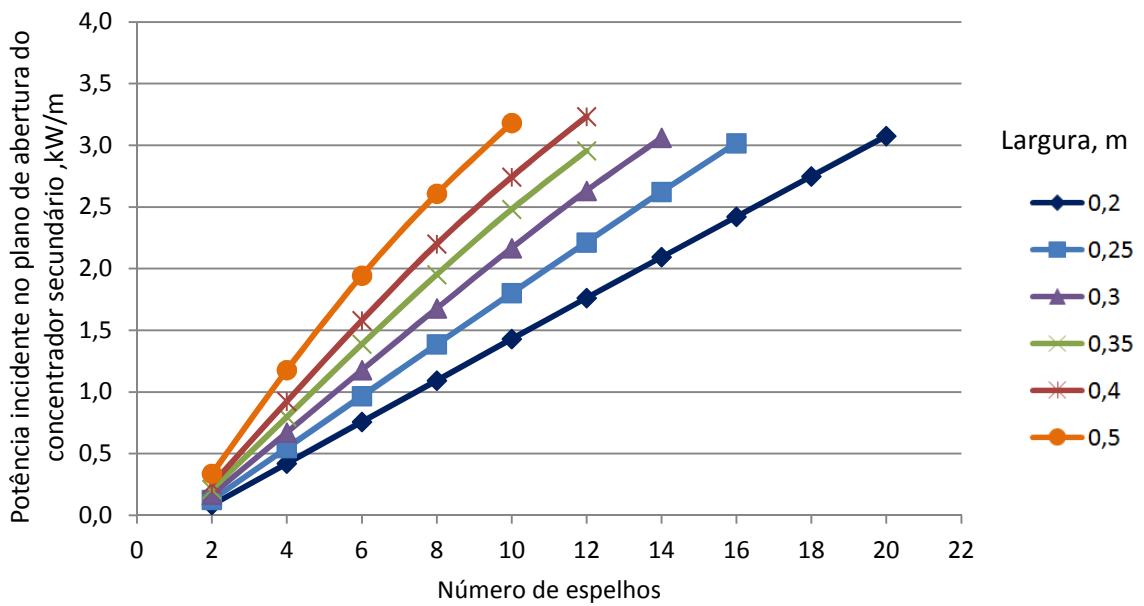


Figura 4.7 Número de espelhos necessários para obter aproximadamente a mesma potência no plano de abertura do concentrador secundário, no equinócio de outono.

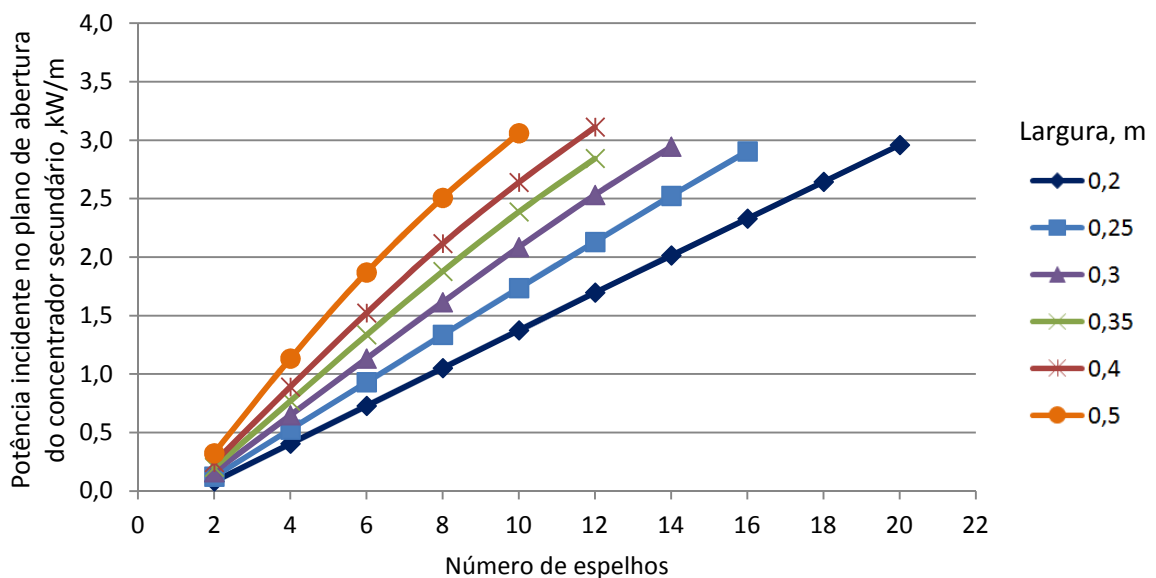


Figura 4.8 Número de espelhos necessários para obter aproximadamente a mesma potência no plano de abertura do concentrador secundário, no equinócio de primavera.

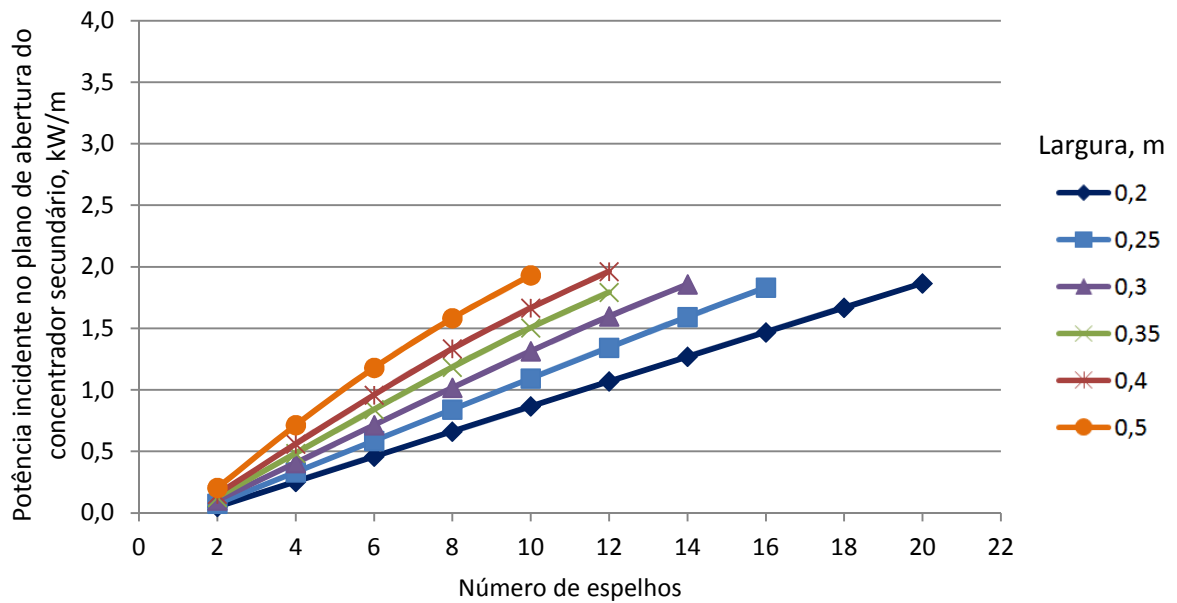


Figura 4.9 Número de espelhos necessários para obter aproximadamente a mesma potência no plano de abertura do concentrador secundário, no solstício de inverno.

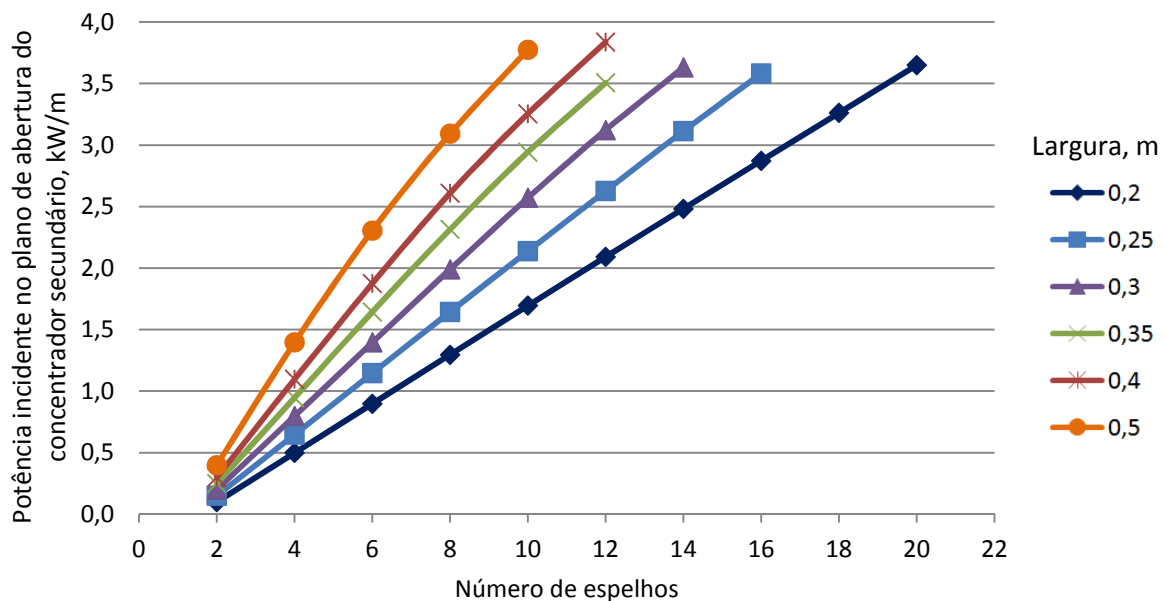


Figura 4.10 Número de espelhos necessários para obter aproximadamente a mesma potência no plano de abertura do concentrador secundário, no solstício de verão.

4.1.2 Influência da altura do receptor

Para verificar a influência da altura do receptor na potência incidente no plano do concentrador secundário foram utilizados também os valores apresentados na Tab. (4.2), sendo

que a altura do receptor foi variada entre 2,0 metros e 6,0 metros. Foram usados dezesseis espelhos no solstício de verão para obter o gráfico de estimativa mostrado na Fig.(4.11).

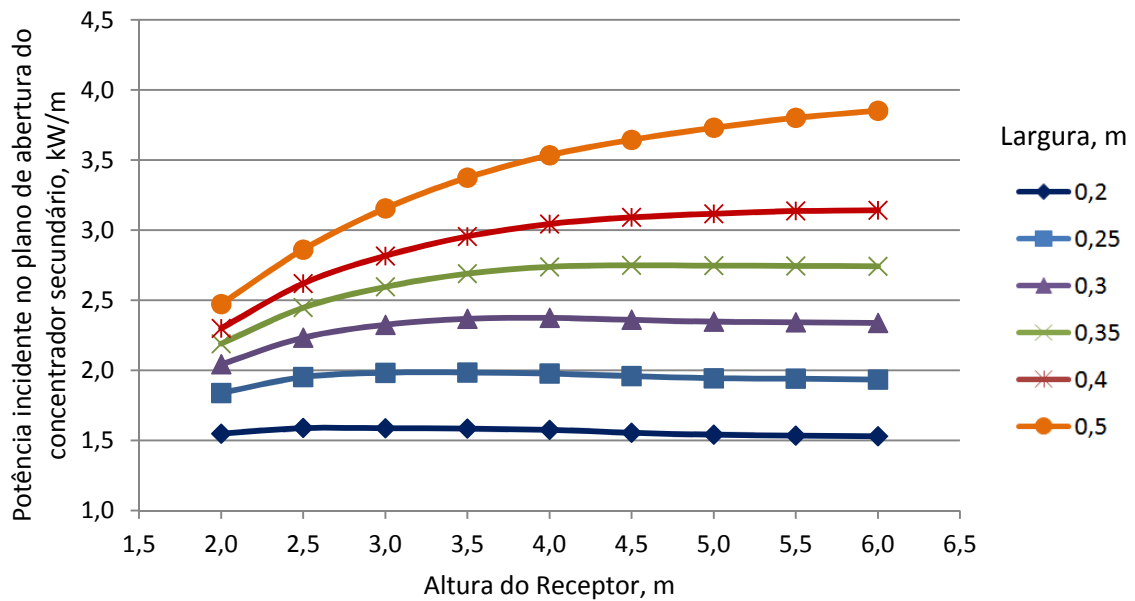


Figura 4.11 Estimativa da potência incidente no plano de abertura do concentrador secundário em função da altura do receptor.

Pode-se observar que a altura do receptor tem um efeito significativo sobre a potência incidente no plano de abertura do concentrador secundário. Com o aumento da altura do receptor, aumenta a potência incidente no plano de abertura do concentrador secundário até um ponto de máximo e depois gradualmente vai reduzindo novamente. Esse comportamento ocorre porque uma vez que varia sua altura acima do ideal, o feixe de radiação refletido continua a divergir até a largura do receptor não receber mais o fluxo máximo. A partir deste momento ele passa a ter perdas por desfocagem. Assim, fazendo uma análise da Fig. (4.11) pode-se definir que a altura ideal para os dezesseis espelhos é entre 2,5 m e 3,5 m para espelhos de 0,2 m a 0,35 m e para os espelhos de 0,4 m até 0,5 m a altura fica entre 4,0 m a 6,0 m.

4.1.3 Efeito da largura do receptor

Para uma condição ideal e utilizando espelhos planos, a largura do receptor deveria ser idêntica à largura do espelho. Na prática, no entanto, aumenta-se a largura do receptor para diminuir a perda por desfocagem do feixe de raios no plano do concentrador secundário. A perda por desfocagem significa que, utilizando espelhos planos, a potência direcionada ao receptor não atinge o plano do concentrador secundário. Além disso, a precisão da superfície

dos espelhos, a precisão do alinhamento dos espelhos e do sistema de seguimento solar tem grande efeito sobre a distribuição do fluxo solar refletido. O efeito da desfocagem é representado na Fig. (4.12).

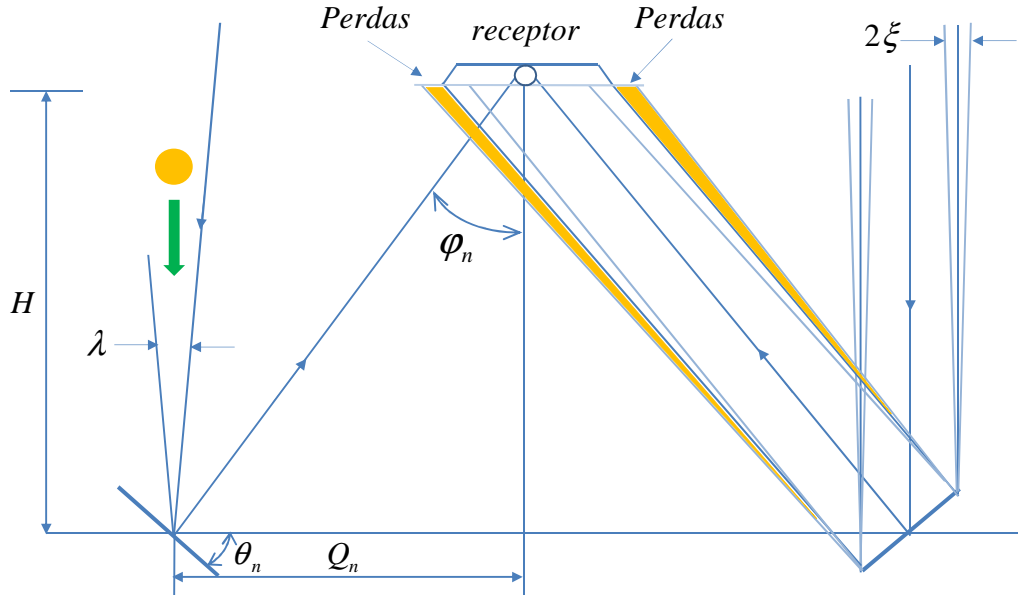


Figura 4.12 Perdas por desfocagem no receptor.

Na Fig. (4.13) são apresentados esses resultados para uma condição onde o receptor foi fixado a 2 m de altura, usados dezesseis espelhos e as 12 h (TSV) para um dia de solstício de verão.

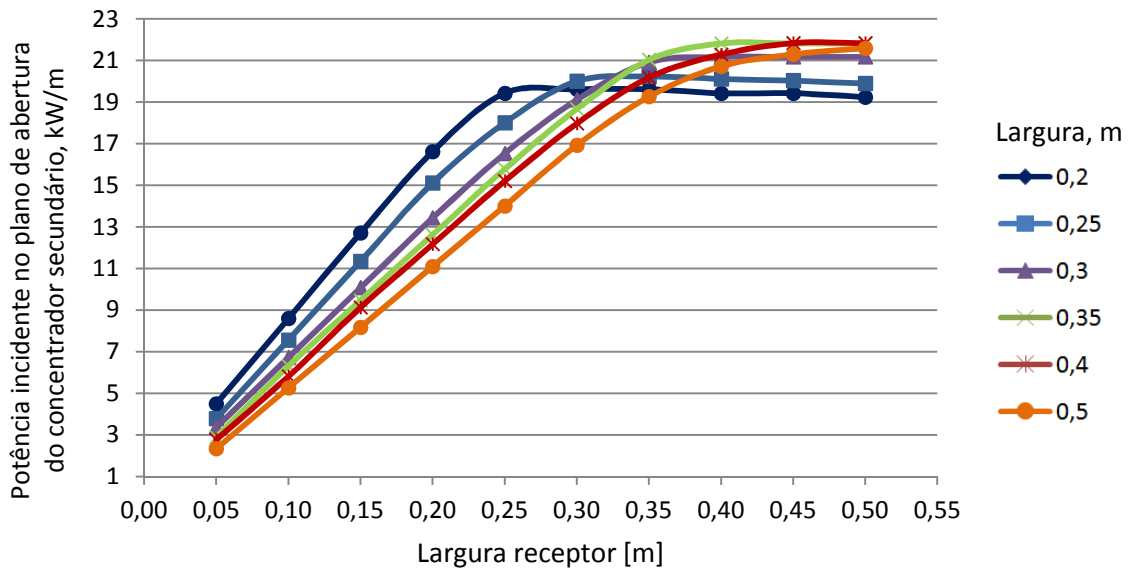


Figura 4.13 Estimativa da potência incidente no plano de abertura do concentrador secundário, em função da largura do receptor.

É importante notar que aumentando a largura do receptor diminuem as perdas por desfocagem (derramamento), pois aumenta-se a potência incidente no plano do concentrador secundário, até um ponto de máximo, que é função da largura de cada espelho. Uma vez que a largura do receptor é maior que o ideal, o sombreamento causado pelo receptor sobre os espelhos abaixo dele também aumenta, causando uma redução gradual na potência incidente no receptor. Pela análise desses resultados, pode-se inferir que, aumentando a largura do receptor em 0,05 m a mais que a largura de um espelho, é suficiente para interceptar a maior parte da radiação refletida pelos espelhos.

4.1.4 Efeito da separação entre os espelhos

Na Fig. (4.14) são apresentados os resultados da variação da separação entre espelhos em função da largura do espelho. Pode ser notado que a potência incidente diminui levemente com o aumento do espaço entre os espelhos. Ao aumentar essa separação, as perdas por bloqueio diminuem. Por outro lado, para um mesmo número de espelhos, aumenta a divergência dos raios refletidos (perdas por desfocagem) em função da maior distância dos espelhos extremos da matriz em relação ao centro do refletor. Assim, pode-se concluir pela análise dessa figura que a separação entre espelhos pode ser definida como 0,01 m, como um compromisso entre as perdas ópticas e a diminuição do comprimento total do refletor.

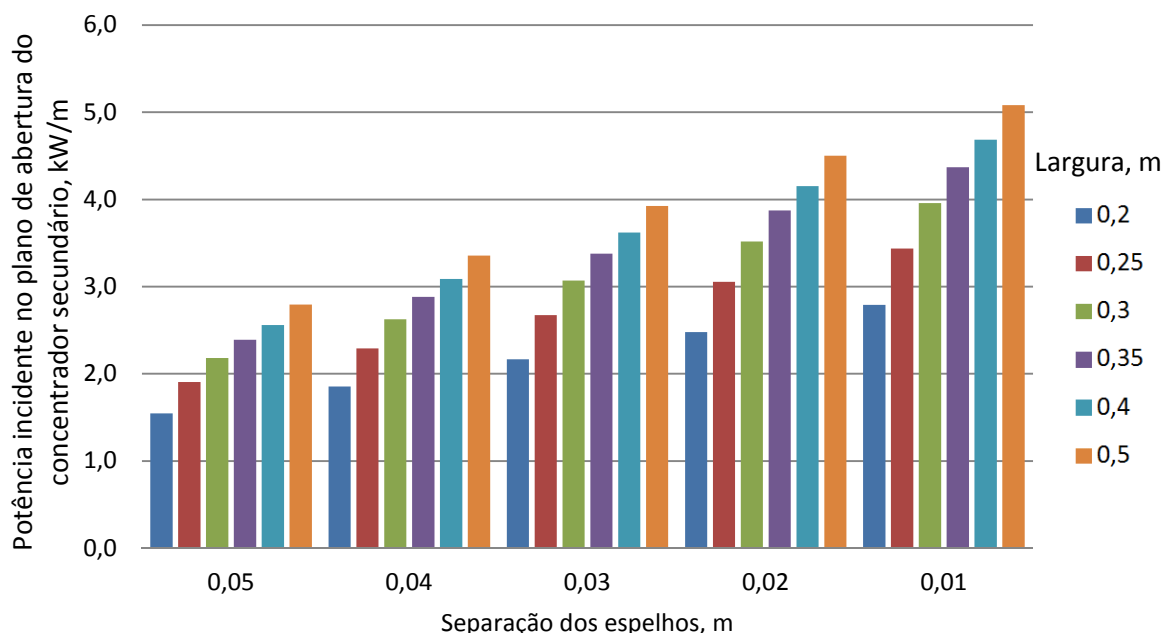


Figura 4.14 Estimativa da potência incidente no plano do concentrador secundário em função da separação entre espelhos e da largura dos espelhos.

4.1.5 Influência das perdas de área por sombreamento e bloqueio

As perdas por bloqueio e sombreamento são afetadas pela posição do Sol em relação à normal ao plano do refletor. Essas perdas tem como efeito a diminuição da área útil do campo refletor (área dos espelhos). Não é difícil perceber que essas perdas incrementam à medida que o Sol se afasta da posição normal ao refletor em direção ao início ou final do dia e que também dependem da largura dos espelhos. Na Fig. (4.15) são mostradas as perdas por sombreamento em relação à área total do refletor, em função do número e da largura dos espelhos, para um dia de solstício de verão, às 8 h (TSV), correspondendo a um ângulo $\lambda = 60^\circ$.

Como observado anteriormente, quanto maior for a largura dos espelhos, maior será o sombreamento entre eles, para um receptor situado a 2 m de altura.

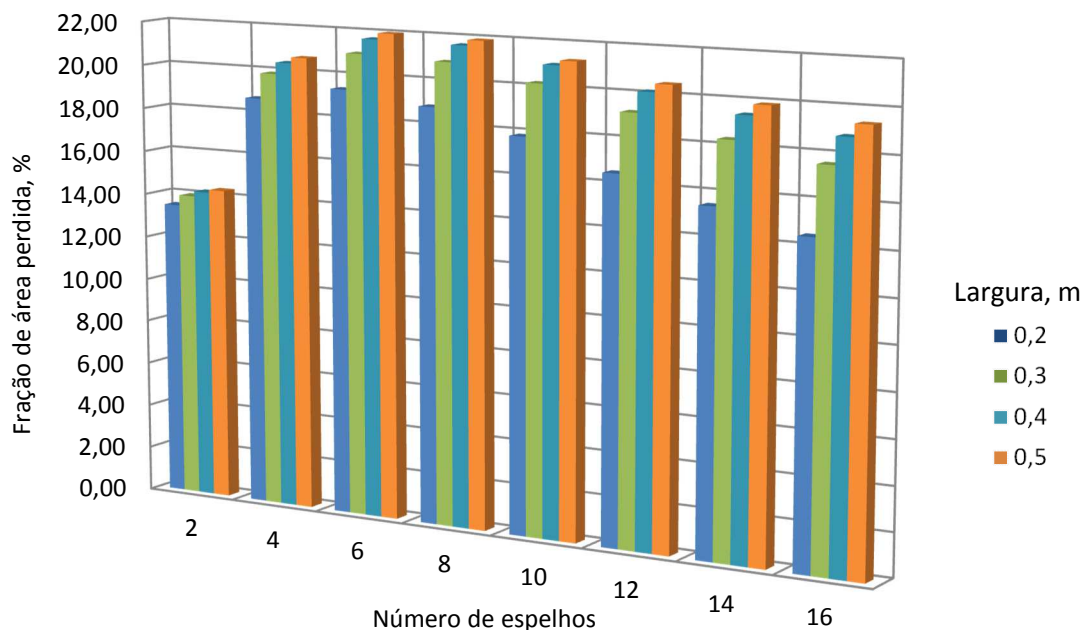


Figura 4.15 Perdas por sombreamento em função do número de espelhos para um ângulo de incidência, λ , de 60° .

De modo semelhante à figura anterior, a Fig. (4.16) apresenta as perdas por bloqueio em relação à área total do refletor, em função do número e da largura dos espelhos, para um dia de solstício de verão, às 8 h (TSV), para um ângulo de incidência, λ , igual a 60° . As perdas de

bloqueio aumentam com a largura e o número de espelhos para um espaçamento fixo entre eles e com o receptor a 2 m de altura.

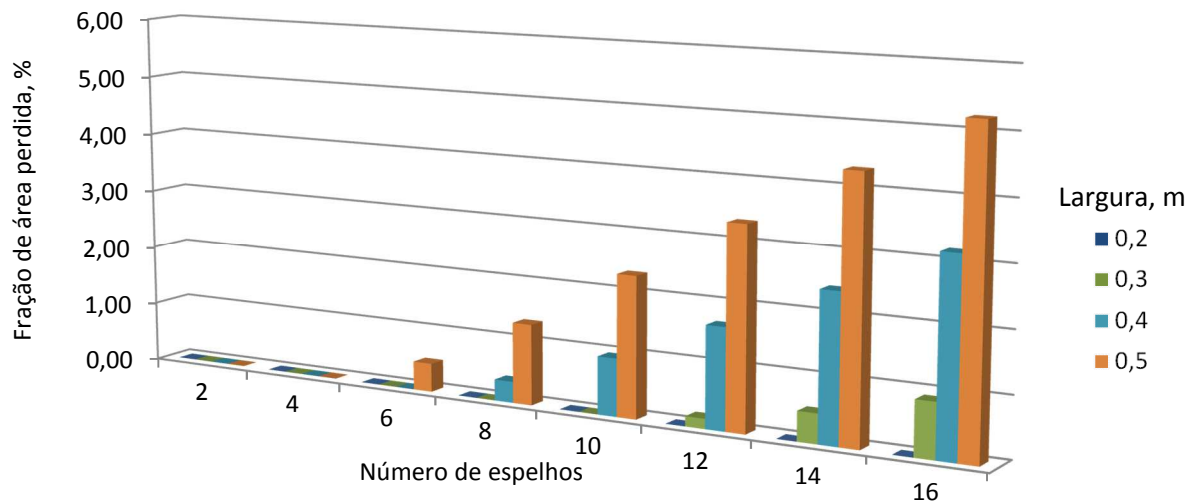


Figura 4.16 Perdas por bloqueio para diferentes números de espelhos, para um ângulo de incidência, λ , igual a 60°.

De modo análogo à análise anterior, a Fig. (4.17) mostra as perdas por bloqueio em relação à área total do coletor, em função do número e da largura dos espelhos, para um dia de solstício de verão, às 12 h (TSV) com um ângulo de incidência, λ , igual a 0°.

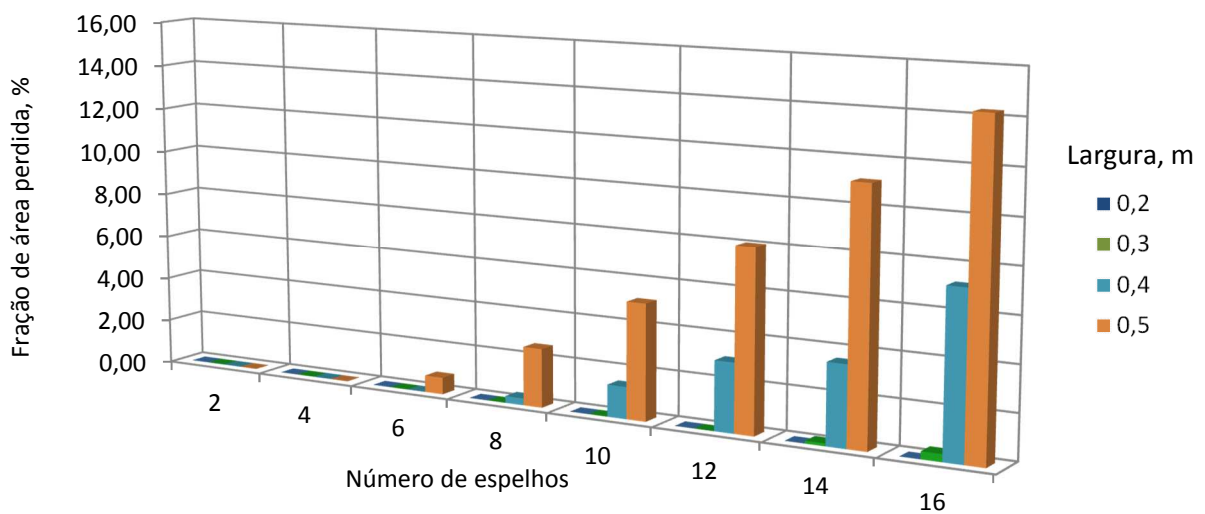


Figura 4.17 Perdas por bloqueio para diferentes números de espelhos, para um ângulo de incidência, λ , igual a 0°.

Para TSV igual a 12 h (aproximadamente $\lambda=0^\circ$), não existem perdas de área por sombreamento, pois a posição geométrica dos espelhos não permite que ocorra obstrução nos raios incidentes nos espelhos.

5 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DO CONCENTRADOR SOLAR

Com o propósito de utilizar o conhecimento obtido ao longo do trabalho, desenvolveu-se um protótipo para validar os processos de posicionamento dos espelhos.

Através dos dados obtidos no MATLAB, pôde-se criar uma tabela que envolve a posição angular de cada espelho, dentro do ciclo de horas de um dia de Sol, que neste caso foi dia 03/08/2016. Assim, constatou-se que são necessários aproximadamente $7,5^\circ$ /hora para que cada fileira de espelhos seja movimentada para o próximo ângulo horário. O ângulo de inclinação de cada espelho com a respectiva hora é mostrado na Tab. (5.1).

Tabela 5.1 - Ângulos correspondentes para cada fileira de espelhos durante um período de Sol entre 7 h da manhã e 17 h da tarde (TSV).

Número da linha de Espelho	-75 ° 7 h	-60 ° 8 h	-45 ° 9 h	-30 ° 10 h	-15 ° 11 h	0 ° 12 h	15 ° 13 h	30 ° 14 h	45 ° 15 h	60 ° 16 h	75 ° 17 h
1	13.48	5.98	-1.52	-9.02	-16.52	-24.02	-31.52	-39.02	-46.52	-54.02	-61.52
2	16.08	8.58	1.08	-6.42	-13.92	-21.42	-28.92	-36.42	-43.92	-51.42	-58.92
3	19.11	11.61	4.11	-0.44	-10.89	-18.39	-25.89	-30.44	-40.89	-48.39	-55.89
4	22.60	15.10	7.60	0.10	-7.40	-14.90	-22.40	-29.90	-37.40	-44.90	-52.40
5	26.54	19.04	11.54	4.04	-3.46	-10.96	-18.46	-25.96	-33.46	-40.96	-48.46
6	30.82	23.32	15.82	8.32	0.82	-6.68	-14.18	-21.68	-29.18	-36.68	-44.18
7	35.28	27.78	20.28	12.78	5.28	-2.22	-9.72	-17.22	-24.72	-32.22	-39.72
8	39.72	32.22	24.72	17.22	9.72	2.22	-5.28	-12.78	-20.28	-27.78	-35.28
9	44.18	36.68	29.18	21.68	14.18	6.68	0.82	-8.32	-15.82	-23.32	-30.82
10	48.46	40.96	33.46	25.96	18.46	10.96	3.46	-4.04	-11.54	-19.04	-26.54
11	52.40	44.90	37.40	29.90	22.40	14.90	7.40	0.10	-7.60	-15.10	-22.60
12	55.89	48.39	40.89	33.39	25.89	18.39	10.89	3.39	-4.11	-11.61	-19.11
13	58.92	51.42	43.92	36.42	28.92	21.42	13.92	6.42	-1.08	-8.58	-16.08

14	61.52	54.02	43.33	39.02	31.52	24.02	16.52	9.02	1.52	-5.98	-13.48
----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------	------	-------	--------

O protótipo do concentrador construído para o desenvolvimento do sistema de rastreamento é uma representação do concentrador real, tendo uma única linha de espelho com o comprimento de 1 m e largura de 0,30 m conforme mostra Fig. (6.2).



Figura 5.1 Protótipo do concentrador em tamanho reduzido.

A estrutura de sustentação foi construída em aço galvanizado, visando dar maior rigidez mecânica ao conjunto.

A estrutura foi montada a aproximadamente 0,75 m do solo, sustentada por seis colunas verticais de aço com ajustes individuais para nivelar a estrutura, independentemente de onde for instalada.

O concentrador secundário onde os raios solares serão recebidos é composto por um anteparo de alumínio pintado na cor preta com dimensão de 0,35 m de largura e 1 m de comprimento, com uma altura de 2 m, como mostrado na Fig. (5.2).



Figura 5.2 – Receptor secundário (absorvedor).

5.1 SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO DOS ESPELHOS

Este tipo de sistema de movimentação tem como princípio a rotação dos espelhos sobre o eixo horizontal, orientado no sentido polar norte-sul e apoiado sobre mancais. Os refletores são montados sobre os espelhos que giram sobre seu eixo de acordo com o movimento aparente do Sol ao longo do dia, de Leste-Oeste.

5.1.1 Micro controlador

O controle do acionamento do motor que movimenta o conjunto de espelhos é realizado com uma placa micro processada, conhecida como Arduino. Este dispositivo é utilizado para a construção de protótipos eletrônicos, de forma simplificada. O cálculo da posição do Sol a cada momento é realizado através de rotinas gravadas em sua memória interna. Dessa forma, e utilizando as equações vistas anteriormente, é calculada a inclinação de cada espelho. Este circuito de controle está ilustrado na Fig. (5.3).

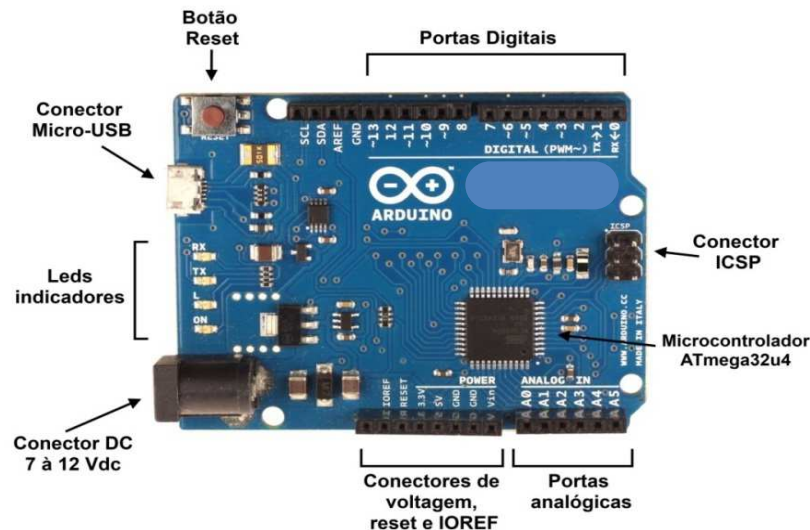


Figura 5.3 Micro controlador Arduino.

5.1.2 Motor e driver de controle

A opção escolhida para a movimentação dos espelhos foi por um motor de passo para satisfazer os requisitos de rastreamento que, apesar do custo, apresenta maior exatidão para o posicionamento dos espelhos. A placa de controle para o motor de passo é conhecida como *driver* e junto com a fonte de alimentação necessária para fornecer a tensão e corrente para movimentação do motor, formam o subsistema de rastreamento do Sol, como mostra a Fig. (5.4).



Figura 5.4 Placa de controle do motor de passo – *driver*.

De acordo com os cálculos realizados, verificou-se que a variação média em cada posição angular do espelho é de aproximadamente $7,5^\circ$ /hora conforme o que foi relatado anteriormente, para cada fileira de espelhos. Motores de passo disponíveis no mercado podem fornecer tanto 200 ou 400 passos por revolução, usando *micro-stepping*. Na Fig. (5.5) é mostrado um modelo de motor de 200 passos por rotação, ou $1,8^\circ$ por passo.



Figura 5.5 Imagem de um motor de 200 passos por revolução.

Para que os espelhos sejam controlados com maior precisão, a redução deve usar um conjunto de engrenagens com relação de 48:1, para obter $0,0375^\circ/\text{passo}$. Sendo assim, é necessário que o motor seja acionado a cada 18 segundos liberando um passo por vez e, ao final dos 200 passos, completando uma revolução com valor igual a $7,5^\circ/\text{hora}$.

Ao iniciar o programa no micro controlador Arduino, o rastreador verifica a hora e a data do sistema. Deste modo, o rastreador redefine-se cada vez que for ligado. Em seguida, o processo começa verificando as coordenadas locais adicionadas no programa, que neste caso são os de latitude $29^\circ 45' 17,979''$ S e longitude $51^\circ 9' 1,019''$ W. Assim, posicionando a fileira de espelho dentro do ângulo para aquele horário, conforme mostrado no APÊNDICE B.

Na Fig. (5.6) é apresentado o diagrama de bloco que mostra os passos iniciais do algoritmo para sincronização do conjunto de espelhos.

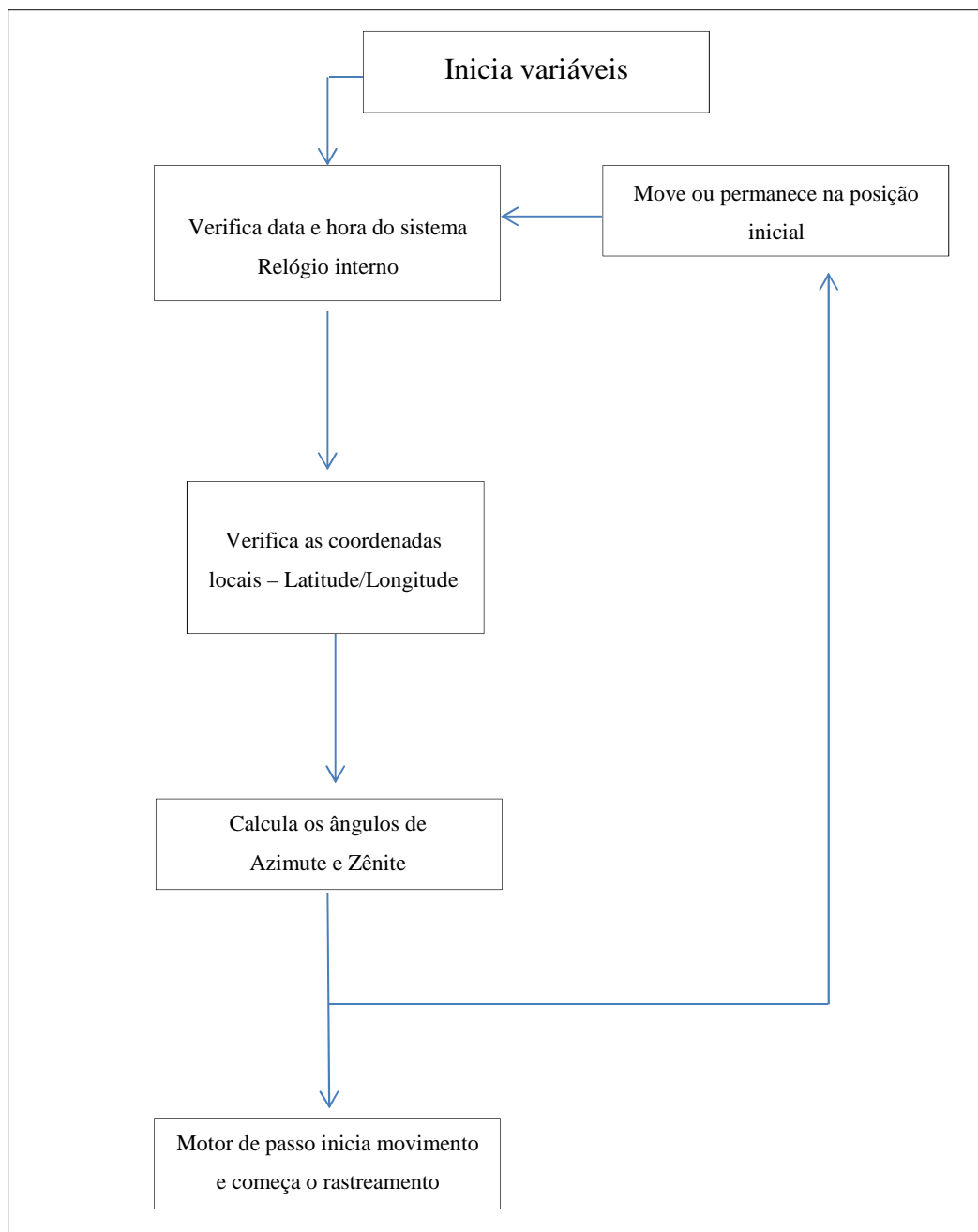


Figura 5.6 Diagrama de bloco do funcionamento do sistema de seguimento solar.

5.2 TESTES COM O PROTÓTIPO

Para desenvolver esta proposta, o espelho deve se movimentar modificando sua posição angular de leste para oeste, seguindo a variação da posição do disco solar durante o dia. Os testes foram executados através dos dados da Tab. (5.1), selecionando uma linha de espelhos, que no caso foi a linha 8. No Apêndice C é mostrada a relação dos ângulos negativos. A movimentação ocorreu durante o dia entre 7 h da manhã e 17 h da tarde (TSV). Com o rastreamento da posição do Sol e levando em consideração que a posição do Sol se modifica aproximadamente $0,25^\circ$ a cada minuto, a atualização da posição do espelho deve ocorrer periodicamente no intervalo de 18 s para minimizar as perdas ópticas. A partir disso, pode-se exibir o comportamento desejado da linha de espelho, exemplificado na Tab. (5.2).

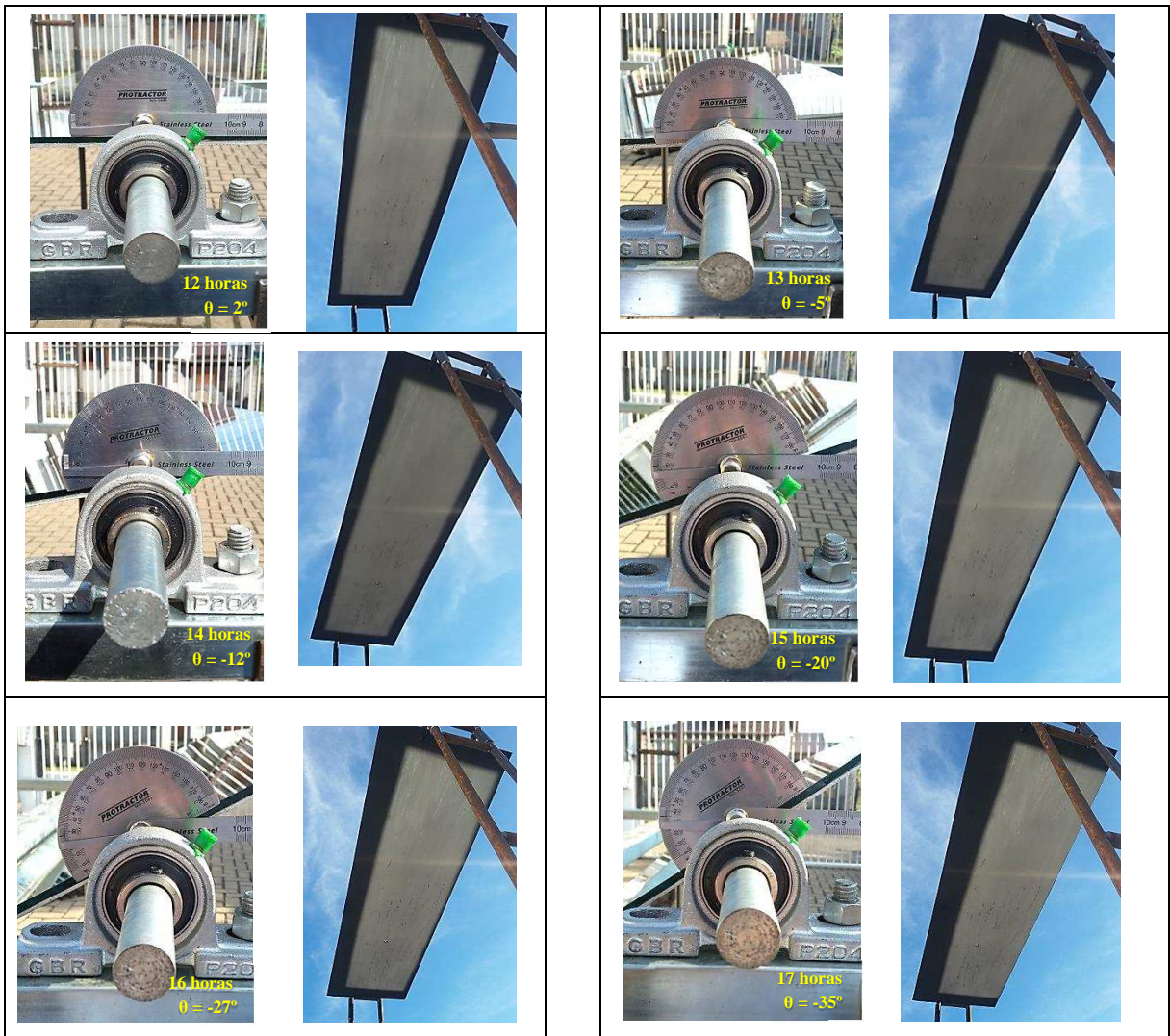




Tabela 5.2 – Verificação da posição do espelho das 7 h até 17 h (TSV).

Tabela 5.2 – Verificação da posição do espelho das 7 h até 17 h (TSV).

(conclusão)



Durante os testes realizados no protótipo, os raios incidentes permaneceram dentro da área do absorvedor, conforme mostrado na Tab. (5.2). Este teste comprova a capacidade do

sistema em conseguir manter a projeção dos raios solares no absorvedor. No entanto, nota-se que no início do dia e no fim da tarde a área projetada é ligeiramente menor que nos demais horários. Este fato deve-se aos maiores ângulos de incidência dos raios solares sobre a superfície coletora conforme mostrado na Tab. (5.3) causando a desfocagem dos raios refletidos.

Tabela 5.3 – Ângulos de incidência do Sol sobre a superfície coletora.

-75 °	-60 °	-45 °	-30 °	-15 °	0 °	15 °	30 °	45 °	60 °	75 °
7 h	8 h	9 h	10 h	11 h	12 h	13 h	14 h	15 h	16 h	17 h

Com a realização destes testes de posicionamento, conseguiu-se validar o sistema de automação desenvolvido, desde a posição angular até os componentes eletrônicos utilizados, assim como o controlador Arduino, ambos atuando conforme os critérios previamente definidos no transcorrer do trabalho.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os primeiros resultados de um estudo para quantificar o desempenho óptico de um LFR. As rotinas e procedimentos para o seguimento solar com estimativa de potência incidente no plano do absorvedor foram implementadas através do MATLAB.

Os resultados obtidos através da simulação permitem quantificar a potência incidente no plano de entrada do concentrador secundário para diferentes geometrias do coletor, mostrando a influência do número de espelhos, altura do receptor, largura e separação entre cada fileira de espelhos.

Os resultados mostram que, para cada conjunto de parâmetros geométricos de um LFR (número e a largura dos espelhos, o espaçamento e a altura do absorvedor) existe um ponto máximo a partir do qual as perdas ópticas aumentam significativamente.

O programa desenvolvido permite verificar o comportamento da potência durante um período diário e nesse trabalho foram utilizados como referência dias típicos de solstício (verão e inverno) e equinócios (primavera e outono).

Os resultados obtidos em nível de potência incidente no plano de abertura do concentrador secundário mostram problemas relacionados com perdas por bloqueio, sombreamentos, desfocagem e rastreamento solar.

A partir da modelagem descrita, o sistema de rastreamento solar foi desenvolvido utilizando uma linguagem de programação simples em um micro controlador conhecido como Arduino, conforme programa no Apêndice B. Todo o processo é executado através de linhas de rotinas programadas em sua memória. Quando iniciado, ele verifica as condições iniciais como data e hora do sistema para primeiramente sincronizar os dados internos e depois com as coordenadas de latitude e longitude local, passa a calcular através das equações que foram

mostradas ao longo deste trabalho. Com isso, é possível controlar o motor de acionamento, posicionando o espelho de uma dada fila no ângulo correspondente àquele horário.

A escolha da realização do rastreamento da posição solar a partir de coordenadas calculadas mostrou-se confiável. Mas caso os dados sejam inseridos de forma incorreta no aplicativo de rastreamento, como data e hora e a localização geográfica do local, podem gerar distorções no cálculo do rastreamento.

De modo geral, o programa desenvolvido conseguiu atingir os objetivos propostos pelo projeto, como a movimentação da linha de espelho e o rastreamento, atingindo seu objetivo principal.

Desta forma, os testes realizados comprovam a funcionalidade do sistema através da constatação que o rastreamento do Sol e a movimentação da linha de espelho, a reflexão da irradiância solar direta no absorvedor dentro dos horários especificados, tem boa precisão. Com isso, percebe-se que a proposta do trabalho, que compreende a validação e automação de um protótipo de um concentrador solar Fresnel linear foi alcançada.

Como sugestão para trabalhos futuros, listam-se os seguintes temas:

- a) Desenvolver, na plataforma MATLAB, simulação com espelhos curvos, analisando suas vantagens ópticas em relação aos espelhos planos;
- b) Estudar os erros associados ao sistema de seguimento e à qualidade dos refletores na potência incidente no absorvedor;
- c) Analisar, via simulação, a distribuição da radiação no plano do absorvedor.

REFERÊNCIAS

ABOUZEID, M., **Use of a reluctance stepper motor for solar tracking based on a programmable logic array (PLA) controller**. *Renewable Energy*, vol.23, pp.551- 560. 2001.

ALMEIDA, G.S.M. **Pesquisa e desenvolvimento de um sistema termoelétrico do tipo linear Fresnel reflector**. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis). s.l., Portugal: Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2013.

CANAVARRO, D.C.S. **Modelização de campos de colectores solares lineares do tipo Fresnel: aplicação a um concentrador inovador do tipo CLFR**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física Tecnológica) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

DAL PAI, A., ESCOBEDO, J. F., ASSUNÇÃO, H. F. **Fatores de Turbidez de Linke na Estimativa da Radiação Solar Direta na Incidência Normal para Elevada Transmissividade Atmosférica**. *XII Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Foz do Iguaçu – PR. 2002.

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. Ed. John Wiley & Sons. 3ª ed. 2006.

EWG, **Combustíveis fósseis e nuclear** – a perspectiva da oferta. Disponível em: <http://resistir.info/peak_oil/ewg_mar13.html> Acesso em: 20 out 2015.

FOCULOSAR. **Concentração de energia solar para geração de potência elétrica**. Disponível em: < <http://focusolar.com.br/concentracao-de-energia-solar-para-geracao-de-potencia-eletrica>> Acesso 20 set 2015.

GUEYMARD, C., **Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data**. *Solar Energy*, vol. 51, n. 2, pp. 121-138, 1993.

HAAGEN, M., **The Potential of Fresnel reflectors for Process Heat Generation in the MENA Region**. Dissertação de Mestrado, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, University of Kassel, 2012.

HÄBERLE, A., **Linear Fresnel collectors**. In Richter, C., Lincot, D.; Gueymard, C.A., *Solar Energy*, New York: Springer, 2013.

IAG/USP. **Astronomia e Astrofísica**. Disponível em:
<<http://www.astro.iag.usp.br/~jane/aga215/apostila/cap07.pdf>> Acesso 14 jun 2015.

IRENA, INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable Energy Technologies - Cost Analysis Series: Concentrating Solar Power**. v.1: Power Sector, n. 2/5, Junho, 2012.

IRENA, INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, IEAETSAP. **Concentrating solar Power: Technology Brief**. 2013.

IQBAL, H. **An introduction to solar radiation**. Toronto: Academic Press, 1983.

KALOGIROU, S. A. **solar energy engineering: processes and systems**. 1^a ed. Academic Press, Elsevier, EUA, 2009.

KARAYEL, M., NAVVAB, E., NE'EMAN, E., SELKOWITZ, S. **Zenith Luminance and Sky Luminance Distributions for Daylight Calculations**. *Energy and Buildings*. Vol. 6. pp. 283-291. 1984.

KASTEN, F., YOUNG, A. T. **Revised optical air mass tables and approximation formula**. *Applied Optics*. Vol. 28. n. 22. 1989.

LIN, M., SUMATHY, K., DAI, Y.J., WANG, R.Z. AND CHEN, Y, 2013. **Experimental and theoretical analysis on a linear Fresnel reflector solar collector prototype with V-shaped cavity receiver**. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 51, p.963-972.

MATHUR, S.S., KANDPAL, T.C. AND NEGI B.S., 1991. **Optical design and concentration characteristics of linear Fresnel reflector solar concentrators – II Mirror elements of equal width**. *Energy Conversion and Management*, Vol. 31, p. 221-232.

MAXPRESS, **Energia Solar térmica no Brasil**. Disponível em:
<http://www.maxpressnet.com.br/Conteudo/1,721150,Energia_solar_termica_ja_representa_mais_de_1_na_matriz_energetica_do_Brasil> Acesso 07 jun 2015.

MCKNIGHT, E. **Solar Electric Facility with Parabolic Mirrors**. Disponível em:
<<http://emcknight.photoshelter.com/image/I00008hoxjNZ8xQE>> Acesso em: 19 set 2015.

MCT, **MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA**, 2014. Disponível em:
<http://www.mct.gov.br/upd_blob/0235/235580.pdf> Acesso 15 set 2015.

OTTOBONI, A.. **Servo-acionamentos**. *Mecatrônica Atual*, São Paulo, n. 6, p. 7-14, out. 2002.

PELLETS, G. **Combustíveis fósseis e nucleares**. Disponível em:
<http://resistir.info/peak_oil/ewg_mar13.html> Acesso 15 abr 2015.

RIGOLLIER, C., BAUER, O., WALD, L. **On the Clear Sky Model of the ESRA – European Solar Atlas Radiation – with Respect of the Heliosat Method**. *Solar Energy*. Vol. 68.n.1. pp. 33 – 48. 2000.

RIGOLLIER, C., WALD, L. **Selecting a Clear Sky Model to Accurately Map Solar Radiation from Satellite Images**. *Remote Sensing in the 21st Century: Economic and Environmental Applications*. Ed. Casanova. Balkema, Rotterdam. 2000.

SILVA, Z.E. **Uso da Energia Solar na Indústria**. Disponível em:
<http://www.cear.ufpb.br/arquivos/Uso_da_Energia_Solar_na_Industria.pdf> Acesso 12 jun 2015.

SOLARPACES. **Mapa mundial de irradiação solar**. Disponível em <
<http://s4solar.com.br/energia-solar/mapas-solari-metricos/>> Acesso 10 abr 2015.

SPENCER, J.W. **Fourier series representation of the position of the sun**. Melbourne: CSIRO Division of Building Research. 1971.

TOLMASQUIM, M. T.. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência: CENERGIA, 2003.

VELÁZQUEZ, N.; García-Valladares, O.; Saucedo, D.; Beltrán, R.; **Numerical simulation of a linear Fresnel reflector Concentrator used as direct generator in a Solar-GAX cycle**; *Energy Conversion and Management*; 2009.

VIVIAN, R. 2015. **Energia solar**. Disponível em:
<www.solargrid.com.br/author/rodrigovivian> Acesso 07 jun 2015.

WALKER, G.S., 2013. **Development of a low cost linear Fresnel solar concentrator**. Master of Science Thesis, Faculty of Engineering at Stellenbosch University.

ZAHLER, C., Schwind, T., Häberle, A., Berger, M. **Direct steam production in a linear concentrating Fresnel collector**. ESTEC, Munich. 2009.

APÊNDICE A - PROGRAMA DESENVOLVIDO EM MATLAB – COLOCAR DADOS DE ENTRADA CONFORME SOLICITAÇÃO:

```
function [output_vec] = modelLFRoptic(input_vec)

%-----

n=input('Digite um dia de 1 a 365: ');
hour=input('Digite a hora local: ');
min=input('Digite os minutos: ');
num_mirrors=input('Número de espelhos: ');
width_mirror=input('Tamanho dos espelhos: ');
receiver_width=input('Largura do receptor: ');
receiver_height=input('Altura do receptor: ');

%-----

clc
figure (2)
newplot
format short

set(gcf, 'Units', 'normalized', 'Position', [0 0.09 1 0.8]) % Define
posição da figura na tela
set(gca, 'LooseInset', 1*(get(gca, 'TightInset'))) % Define tamanho da
amostragem na tela

%-----

% Dados sobre coordenadas locais

%-----

L_loc=-51; % Longitude local
L_st=-45; % Longitude padrão
phi_l=-29; % Latitude local

hour = 8;
min = 00;
time_loc = ((hour*60)+min)/60;
n = 218;
B = ((n-1)*360)/365;
T = pi()/180; %conversão de graus para radianos
```

```

%-----
%Fator de correção [minutos]
%-----
E = 229.2*(0.000075+0.001868*cos(B*T)-0.032077*sin(B*T)-
0.014615*cos(2*B*T)-0.04089*sin(2*B*T));
d = (0.006918-0.399912*cos(B*T)+0.070257*sin(B*T)-
0.006758*cos(2*B*T)+0.000907*sin(2*B*T)-
0.002697*cos(3*B*T)+0.00148*sin(3*B*T)); %declinação em radianos
d = d/T; %em graus
%-----

%Tempo solar verdadeiro
%-----
TSV = (time_loc)+(4*(L_st-L_loc)/60)+E/60; %horas
%Valor do omega em graus
omega=15*(abs(TSV)-12);
%-----

thetaz =
(acos((cos(phi_l*T)*cos(d*T)*cos(omega*T))+(sin(phi_l*T)*sin(d*T)))); %em
radianos
thetaz = thetaz/T;
alpha = (90 - thetaz);

if omega >= 0
    gamma_s = abs(acos((cos(thetaz*T)*sin(phi_l*T)-
sin(d*T))/(sin(thetaz*T)*cos(phi_l*T))));
end
if omega < 0
    gamma_s = -(abs(acos((cos(thetaz*T)*sin(phi_l*T)-
sin(d*T))/(sin(thetaz*T)*cos(phi_l*T))));
end

gamma_s = gamma_s/T;
rho = atan((sin(thetaz*T)*sin(gamma_s*T))/(cos(thetaz*T)));

% Rotinas de alimentação do sistema
% -----

sun_angle = rho; % Valores positivos e negativos +90 ou -90 este é o rho
num_mirrors = 12; % Número de espelhos
width_mirror = 0.5; %tamanho dos espelhos (metro)
gap_mirror = 0.01; %espaço entre espelhos (metro)
gap_increment = 0.01; %distancia dos espelhos (metro)
offset_increment_x = 0.01; % compensação eixo x
offset_increment_y = 0.01; % compensação eixo y
ray_mirror = 10; % Raio do espelho
receiver_height = 2.0; %altura do receptor (metro)
receiver_width = 0.55; %largura do receptor (metro)
receiver_depth = 0.1; %dimensão do concentrador para cima
l_l = 1; % Comprimento dos espelhos em metros
subtend_angle = (16/60)*pi()/180;

%-----

% Calculo do espaço entre os espelhos
%-----

```

```

mirror_gaps(num_mirrors/2+1) = gap_mirror;
mirror_gaps(num_mirrors/2) = gap_mirror;
for i = (num_mirrors/2+2):num_mirrors
    mirror_gaps(i) = mirror_gaps(i-1)+gap_increment;
end
for i = (num_mirrors/2-1):-1:1
    mirror_gaps(i) = mirror_gaps(i+1)+gap_increment;
end
%-----

% Condição para evitar divisão por zero

%-----

if sun_angle >= ((pi()/2)-(0.5*pi()/180))
    sun_angle = ((90-0.5)*pi()/180);
elseif sun_angle <= ((-1)*(pi()/2)+(0.5*pi()/180))
    sun_angle = (-1)*((90-0.5)*pi()/180);
end
%-----

% Calculo da compensação no posicionamento dos espelhos

%-----

if do_offset == 1
    offset_x(num_mirrors/2+1) = 0.00001;
    offset_x(num_mirrors/2) = -0.00001;
    offset_y(num_mirrors/2+1) = -0.00001;
    offset_y(num_mirrors/2) = -0.00001;
    for i = (num_mirrors/2+2):num_mirrors
        offset_x(i) = offset_x(i-1)+offset_increment_x;
        offset_x = logical(offset_x);
        offset_y(i) = offset_y(i-1)-offset_increment_y;
    end
    for i = (num_mirrors/2-1):-1:1
        offset_x(i) = offset_x(i+1)-offset_increment_x;
        offset_y(i) = offset_y(i+1)-offset_increment_y;
    end
else
    for t = 1:num_mirrors
        offset_x(t) = 0;
        offset_y(t) = 0;
        delta_x(t) = 0;
        delta_y(t) = 0;
    end
end
%-----

% Calculo da posição do ponto central

%-----

x_pos(num_mirrors/2+1) = mirror_gaps(num_mirrors/2+1)/2+width_mirror/2;
x_pos(num_mirrors/2) = (-mirror_gaps(num_mirrors/2)/2)-width_mirror/2;
for i = (num_mirrors/2+2):num_mirrors
    x_pos(i) = x_pos(i-1)+width_mirror+mirror_gaps(i);
end

```

```

for i = (num_mirrors/2-1):-1:1
    x_pos(i) = x_pos(i+1)-width_mirror-mirror_gaps(i);
end
%-----

% Solução dos Thetas para compensação da posição dos espelhos

%-----

hold on
for l = 1:num_mirrors
    plot(x_pos(l),0,'+r') % Posição do espelho no plano x
    if do_offset == 1
        h_offset(l) = sqrt((offset_x(l))^2+(offset_y(l))^2);
        alpha(l) = atan(abs(offset_y(l))/abs(offset_x(l))); % Calculo do
ângulo alpha
        equ =
[('( ',num2str(x_pos(l)), '+', num2str(h_offset(l)), '*cos(', num2str(alpha(l)), '
-
x))/(', num2str(receiver_height), '+', num2str(h_offset(l)), '*sin(', num2str(al
pha(l)), '-x))-tan(2*x+', num2str(sun_angle), ')']];
        x0 = [0,0];
        [x,fval] = fsolve(equ,x0);
        theta(l) = x(1,1);
    end
end
%-----

% Seta a escala de plotagem do eixo X

%-----
xmax = 4;
xmin = -4;
ymin = -0.5;
ymax = 3.5;
axis([xmin xmax ymin ymax])
plot(0,receiver_height,'+r')
plot([-4 4], [0 0],'r') %eixo dos espelhos
x_receiver = [(receiver_width/2) (receiver_width/2) -1*(receiver_width/2) -
1*(receiver_width/2)];
%aumenta ou diminui tamanho da aba do concentrador
y_receiver = [receiver_height (receiver_height+receiver_depth)
(receiver_height+receiver_depth) receiver_height];
plot(x_receiver,y_receiver,'k', 'LineWidth', 2) %Posição do concentrador e
cor
%-----

% Sombreamento do receptor

%-----

if sun_angle >= 0

    l_shadow =
tan(sun_angle+subtend_angle)*(receiver_height+receiver_depth);
    x2_shadow = (-1)*((receiver_width/2)+l_shadow);
    l2_shadow = receiver_height*tan(sun_angle-subtend_angle);
    x1_shadow = (receiver_width/2)-l2_shadow;
    x_shadow = [x1_shadow x2_shadow];
    y_shadow = [0 0];

```

```

shadow_leftx = [x2_shadow (-(receiver_width/2))];
shadow_lefty = [0 (receiver_height+receiver_depth)];
shadow_rightx = [x1_shadow (receiver_width/2)];
shadow_righty = [0 receiver_height];

elseif sun_angle < 0

    l_shadow = (-1)*tan(sun_angle-
subtend_angle)*(receiver_height+receiver_depth);
    x1_shadow = ((receiver_width/2)+l_shadow);
    l2_shadow = (-1)*receiver_height*tan(sun_angle+subtend_angle);
    x2_shadow = (-1)*(receiver_width/2)+l2_shadow;
    x_shadow = [x1_shadow x2_shadow];
    y_shadow = [0 0];
    shadow_leftx = [x2_shadow (-(receiver_width/2))];
    shadow_lefty = [0 (receiver_height)];
    shadow_rightx = [x1_shadow (receiver_width/2)];
    shadow_righty = [0 (receiver_height+receiver_depth)];
end

%-----
% Calculo da latitude
%-----
phi(i) = atan((x_pos(i)+delta_x(i))/(receiver_height-delta_y(i))); %
função corrente do ângulo solar em um espelho
if do_offset == 0
    theta(i) = ((phi(i)-sun_angle)/2); % ângulo de inclinação de um
espelho
end
%-----

% Curva principal do espelho
%-----

for k = 1:num_mirrors
    theta(k) = (phi(k)-sun_angle)/2;
    x1(k) = x_pos(k)+delta_x(k)+(width_mirror/2)*cos(theta(k));
    x2(k) = x_pos(k)+delta_x(k)-(width_mirror/2)*cos(theta(k));
    y1(k) = delta_y(k)+(width_mirror/2)*sin(theta(k));
    y2(k) = delta_y(k)-(width_mirror/2)*sin(theta(k));
    x1current = x1(k);
    x2current = x2(k);
    y1current = y1(k);
    y2current = y2(k);
    xplot = [x1current x2current];
    yplot = [y1current y2current];

blocked = 0;
if theta(k) < 0 && phi(k) < 0 && k < num_mirrors
    if (x1current+tan(phi(k)-subtend_angle)*(y1current-delta_y(k))) >
(x2(k+1)+tan(phi(k)-subtend_angle)*(y2(k+1)-2*delta_y(k+1)+delta_y(k)))
        blocked = 1;
        l1 = (x1current+tan(phi(k)-subtend_angle)*(y1current-delta_y(k)))-
(x2(k+1)+tan(phi(k)-subtend_angle)*(y2(k+1)-delta_y(k)));
        w1 = l1*cos(phi(k)-subtend_angle);
        h1 = w1/(sin((pi()/2)+(phi(k)-subtend_angle)-theta(k)));
        blockedx = h1*cos(theta(k));

```



```

        blocked_y = (-1)*h1*sin(theta(k));
        x1current = x1current-blocked_x;
        y1current = y1current+blocked_y;
        bloqueio(k) = blocked_x;
        bloqueiores = sum(bloqueio)

        fid = fopen('bloqueio.xls','w+'); %Cria area de bloqueio
        fprintf(fid,'%f\n', bloqueio);
        fclose(fid);
    end
end

if theta(k) > 0 && phi(k) > 0 && k > 1
    if (x2current+tan(phi(k)+subtend_angle)*(y2current-delta_y(k))) <
(x1(k-1)+tan(phi(k)+subtend_angle)*(y1(k-1)-delta_y(k)))
        blocked = 1;
        l1 = (x1(k-1)+tan(phi(k)+subtend_angle)*(y1(k-1)-delta_y(k)))-
(x2current+tan(phi(k)+subtend_angle)*(y2current-delta_y(k)));
        w1 = l1*cos(phi(k)+subtend_angle);
        h1 = w1/(sin(pi()/2)-phi(k)+subtend_angle+theta(k));
        blocked_x = h1*cos(theta(k));
        blocked_y = h1*sin(theta(k));
        x2current = x2current+blocked_x;
        y2current = y2current+blocked_y;
        bloqueio(k) = blocked_x;
        bloqueiores = sum(bloqueio)
        fid = fopen('bloqueio.xls','w+');
        fprintf(fid,'%f\n', bloqueio);
        fclose(fid);
    end
end

%-----
% Sombreamento
%-----

if sun_angle < 0 && theta(k) > 0 && k > 1

    xn_1 = x1(k-1);
    yn_1 = y1(k-1);
    A2 = (x_pos(k)+delta_x(k)-(xn_1+(tan((-1)*(sun_angle-
subtend_angle))*(yn_1-delta_y(k)))))*sin((pi()/2)+(sun_angle-
subtend_angle));
    A1 = sin((pi()/2)-(sun_angle-
subtend_angle+theta(k)))*(width_mirror/2);

    if A2 < A1

        shaded = 1;

        xnew = x_pos(k)+delta_x(k)-(A2/sin((pi()/2)+(sun_angle-
subtend_angle)+theta(k)))*cos(theta(k));
        ynew = delta_y(k)+(-1)*(A2/sin((pi()/2)+(sun_angle-
subtend_angle)+theta(k)))*sin(theta(k));
        sombra(k) = A1-A2
        sombrasres = sum(sombra)
        fid = fopen('sombras.xls','w+');

```

```

fprintf(fid, '%f\n', sombra);
fclose(fid);
    if blocked == 1 && xnew < x2current

    else

        x2current = xnew;
        y2current = ynew;

        x_in_left_top = x2current+(receiver_height-
y2current+delta_y(k))*tan(sun_angle-subtend_angle);
        y_in_left_top = receiver_height;

        x_out_left_top = x2current-(receiver_height-
y2current)/tan((pi()/2)-phi(k));
        y_out_left_top = receiver_height;

    end

    if xnew > x_in_centre_mirror

        x_in_centre = [x_in_left_top x2current];
        y_in_centre = [y_in_left_top y2current];
        x_out_centre = [x_out_left_top x2current];
        y_out_centre = [y_out_left_top y2current];

    end
end
end

if sun_angle > 0 && theta(k) < 0 && k < num_mirrors

    xn_1 = x2(k+1);
    yn_1 = y2(k+1);

    A2 = (xn_1-x_pos(k)-delta_x(k)-(tan(sun_angle+subtend_angle)*(yn_1-
delta_y(k))))*sin((pi()/2)-(sun_angle+subtend_angle));
    A1 = sin((pi()/2)-(sun_angle+subtend_angle+theta(k)))*(width_mirror/2);

    if A2 < A1

        shaded = 1;

        xnew = x_pos(k)+delta_x(k)+(A2/sin((pi()/2)-
(sun_angle+subtend_angle)-theta(k)))*cos(theta(k));
        ynew = delta_y(k)+(A2/sin((pi()/2)-(sun_angle+subtend_angle)-
theta(k)))*sin(theta(k));
        sombra(k) = A1-A2
        sombrasres = sum(sombra)
        fid = fopen('sombras.xls', 'w+');
        fprintf(fid, '%f\n', sombra);
        fclose(fid);

        if blocked == 1 && xnew > x1current
            %
        else
            %

```

```

        xlcurrent = xnew;
        ylcurrent = ynew;

        x_in_right_top = xlcurrent+(receiver_height-
ylcurrent+delta_y(k))*tan(sun_angle+subtend_angle);
        y_in_right_top = receiver_height;

        x_out_right_top = xlcurrent-(receiver_height-
ylcurrent)/tan((pi()/2)-phi(k));
        y_out_right_top = receiver_height;
        %
    end

    if xnew < x_in_centre_mirror

        x_in_centre = [x_in_right_top xlcurrent];
        y_in_centre = [y_in_right_top ylcurrent];
        x_out_centre = [x_out_right_top xlcurrent];
        y_out_centre = [y_out_right_top ylcurrent];
    end
end
end
%-----

% Sombreamento do Receptor

%-----

if sun_angle >= 0

    x2_sun = x2current+(width_mirror-y2current)/tan((pi()/2)-sun_angle-
subtend_angle);
    y2_sun = width_mirror;
    x1_sun = xlcurrent+(width_mirror-ylcurrent)/tan((pi()/2)-
sun_angle+subtend_angle);
    y1_sun = width_mirror;
    x2_shade = x2_shadow+width_mirror/tan((pi()/2)-sun_angle-
subtend_angle);
    x1_shade = x1_shadow+width_mirror/tan((pi()/2)-
sun_angle+subtend_angle);

elseif sun_angle < 0

    x2_sun = x2current-(width_mirror-y2current)/tan((pi()/2)+sun_angle-
subtend_angle);
    y2_sun = width_mirror;
    x1_sun = xlcurrent-(width_mirror-
ylcurrent)/tan((pi()/2)+sun_angle+subtend_angle);
    x2_shade = x2_shadow-
width_mirror/tan((pi()/2)+sun_angle+subtend_angle);
    x1_shade = x1_shadow-width_mirror/tan((pi()/2)+sun_angle-
subtend_angle);
end

%-----

% Verifica se existe sombra nos espelhos, define ângulo central e das
extremidades.

```

```

%-----
if x1_shade >= x1_sun && x2_shade <= x2_sun
    complete = 0;
    shaded_aperture = 1;

elseif x1_shade > x1_sun && x2_shade > x2_sun && x2_shade < x1_sun
    rightshade = 1;

    if sun_angle <= 0

        reduce = (-1)*(width_mirror-y2current)*tan(sun_angle-
2*subtend_angle)+(width_mirror-y2current)*tan(sun_angle);
        w2 = (x2_shade-x2_sun-reduce)*cos(sun_angle+subtend_angle);
        h2 = w2/(cos((-1)*sun_angle-theta(k)));
        xdif = h2*cos(theta(k));
        ydif = h2*sin(theta(k));
        x1current = x2current +xdif;
        y1current = y2current +ydif;

    elseif sun_angle > 0

        w2 = (x2_shade-x2_sun)*cos(sun_angle-subtend_angle);
        h2 = w2/(cos(sun_angle+theta(k)));
        xdif = h2*cos(theta(k));
        ydif = h2*sin(theta(k));
        x1current = x2current +xdif;
        y1current = y2current +ydif;

    end

elseif x1_shade < x1_sun && x2_shade < x2_sun && x1_shade > x2_sun
    leftshade =1;

    if sun_angle <= 0

        w2 = (x1_sun - x1_shade)*cos(sun_angle+subtend_angle);
        h2 = w2/(cos((-1)*sun_angle-theta(k)));
        xdif = h2*cos(theta(k));
        ydif = h2*sin(theta(k));
        x2current = x1current -xdif;
        y2current = y1current -ydif;

    elseif sun_angle > 0

        w2 = (x1_sun - x1_shade)*cos(sun_angle-subtend_angle);
        h2 = w2/(cos(sun_angle+theta(k)));
        xdif = h2*cos(theta(k));
        ydif = h2*sin(theta(k));
        x2current = x1current -xdif;
        y2current = y1current -ydif;

    end

    elseif x1_shade < x1_sun && x2_shade > x2_sun
        middleshade = 1;
end

```

```

%-----
% Ângulo receptor
%-----

receiver_height_above_glazing = 0.02;

receiver_angles(k,1) = x1current-(receiver_height-
receiver_height_above_glazing-y1current)/tan((pi()/2)-
phi(k)+subtend_angle);
receiver_angles(k,2) = ((pi()/2)+phi(k)+subtend_angle);
receiver_angles(k,3) = x2current-(receiver_height-
receiver_height_above_glazing-y2current)/tan((pi()/2)-phi(k)-
subtend_angle);
receiver_angles(k,4) = ((pi()/2)+phi(k)-subtend_angle);
plot(xplot,yplot,'k', 'LineWidth', 2);
disp(theta*180/pi());
plot(x_in_centre, y_in_centre, 'y');
plot(x_out_centre, y_out_centre, 'c');
plot(x_shadow, y_shadow, 'r', 'LineWidth',1)
plot(shadow_leftx, shadow_lefty,'--k', 'LineWidth', 1)
plot(shadow_rightx, shadow_righty,'--k', 'LineWidth',1)

%-----

% plota os raios incidentes do sol nos espelhos do lado esquerdo
%-----

plot([x_in_left_top x2current],[y_in_left_top y2current],'y', 'LineWidth',
1)

%-----

% plota os raios refletidos do sol para o receptor, espelhos esquerdos
%-----

plot([x_out_left_top x2current],[y_out_left_top y2current],'c',
'LineWidth', 1)

%-----

% plota os raios incidentes do sol nos espelhos do lado direito
%-----

plot([x_in_right_top x1current],[y_in_right_top y1current],'y',
'LineWidth', 1)

%-----

% plota os raios refletidos do sol para o receptor, espelhos direitos
%-----

plot([x_out_right_top x1current],[y_out_right_top y1current],'c',
'LineWidth', 1)

```

```

end
%-----

% Area de Abertura

%-----
new_aperture = 0;
iluminated_lenght = (x1current-x2current)/(cos(theta(k)));

if sun_angle > 0 && theta(k) > 0 && shaded_aperture == 0

    new_aperture = sin((pi()/2)-sun_angle-theta(k))*iluminated_lenght;
    aperture_width = aperture_width+new_aperture;

elseif sun_angle > 0 && theta(k)< 0 && shaded_aperture == 0

    new_aperture = sin((pi()/2)-sun_angle-theta(k))*iluminated_lenght;
    aperture_width = aperture_width+new_aperture;

elseif sun_angle < 0 && theta(k) > 0 && shaded_aperture == 0

    new_aperture = sin((pi()/2)+sun_angle+theta(k))*iluminated_lenght;
    aperture_width = aperture_width+new_aperture;

elseif sun_angle < 0 && theta(k) < 0 && shaded_aperture == 0

    new_aperture = sin((pi()/2)+sun_angle+theta(k))*iluminated_lenght;
    aperture_width = aperture_width+new_aperture;

elseif sun_angle == 0 && theta(k) < 0 && shaded_aperture == 0

    new_aperture = sin((pi()/2)+theta(k))*iluminated_lenght;
    aperture_width = aperture_width+new_aperture;

elseif sun_angle == 0 && theta(k) > 0 && shaded_aperture == 0

    new_aperture = sin((pi()/2)-theta(k))*iluminated_lenght;
    aperture_width = aperture_width+new_aperture;

end

shaded = 0;
shaded_aperture= 0;

footprint = 2*(x_pos(num_mirrors)+delta_x(num_mirrors)+(width_mirror/2)); %
é largura total do arranjo de espelhos
posic = x_pos; % posição de cada espelho no eixo X

output_vec(1,1) = aperture_width;
output_vec(1,2) = footprint;
output_vec(1,3) = receiver_flux;

                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```



APÊNDICE B - PROGRAMA DESENVOLVIDO PARA ARDUINO – CÓDIGO FONTE PARA CALCULAR ZENITE, AZIMUTE PARA POSICIONAR O MOTOR

```
// Programa : Rastreador Solar
```

```
#include "Wire.h"
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Helios.h>
#include <icrmacros.h>
#include <SoftwareSerial.h>

//Carrega a biblioteca do RTC DS1307

// Modulo RTC no endereco 0x68
#define DS1307_ADDRESS 0x68
//Modulo RTC DS1307 ligado as portas A4 e A5 do Arduino

// Modulo I2C display no endereco 0x27
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,2,1,0,4,5,6,7,3, POSITIVE);
Helios helios;

float stepsize = 1.8/48.0;
float motorpos = 0.0;
float phimirror = atan(120.0/2080.0);
int limitswitch3 = 0;
SoftwareSerial mySerial(2,3);

byte zero = 0x00;

void setup()
{
  // Define o LCD com 20 colunas e 4 linhas
  lcd.begin(20, 4);
  Wire.begin();
  Serial.begin(9600);
  // A linha abaixo pode ser retirada apos setar a data e hora
```

```

// SeleccionaDataeHora();

pinMode(13, OUTPUT);
Serial.begin(9600);
digitalWrite(13, LOW);
pinMode(8, OUTPUT);
pinMode(6, INPUT);
pinMode(7, OUTPUT);
pinMode(10, INPUT);
digitalWrite(8, HIGH);
digitalWrite(7,HIGH);
pinMode(2, INPUT);
mySerial.begin(9600);
int limitswitch = 0;
while (limitswitch != 1)
}

void loop()
{
  Mostrarelogio();
  delay(1000);

  if (Hourval >0 && Minuteval >0 && Secondval>0 && Yearval >0 && Monthval >0 &&
  Dayval >0)
  {
    float leapyearcheck1 = Yearval/4.0;
    float leapyearcheck2 = Yearval/4;
    int leapyear = 0;
    if (leapyearcheck1 == leapyearcheck2)
    {
      leapyear = 1;
    } else
    {
      leapyear = 0;
    }
    int daynumber = 1;
    switch (Monthval) {
    case 1:
      daynumber = Dayval;
      break;
    case 2:
      daynumber = Dayval + 31;
      break;
    case 3:
      daynumber = Dayval + 59 +leapyear;
      break;
    case 4:
      daynumber = Dayval + 90 +leapyear;
      break;
    case 5:

```



```

daynumber = Dayval + 120 +leapyear;
break;
case 6:
daynumber = Dayval + 151 +leapyear;
break;
case 7:
daynumber = Dayval + 181 +leapyear;
break;
case 8:
daynumber = Dayval + 212 +leapyear;
break;
case 9:
daynumber = Dayval + 243 +leapyear;
break;
case 10:
daynumber = Dayval + 273 +leapyear;
break;
case 11:
daynumber = Dayval + 304 +leapyear;
break;
case 12:
daynumber = Dayval + 334 +leapyear;
break;
}

```

```

int daynum = 1;
switch(Yearval) {
case 2012:
daynum = daynumber;
break;
case 2013:
daynum = daynumber + 366;
break;
case 2014:
daynum = daynumber + 731;
break;
case 2015:
daynum = daynumber +1096;
break;
case 2016:
daynum = daynumber;
break;
case 2017:
daynum = daynumber + 366;
break;
case 2018:
daynum = daynumber + 731;
break;
case 2019:
daynum = daynumber + 1096;

```

```

break;
default:
daynum = daynumber;

}

void SeleccionaDateeHora() // Seta a data e a hora do DS1307
{
byte segundos = 00; // Valores de 0 a 59
byte minutos = 40; // Valores de 0 a 59
byte horas = 22; // Valores de 0 a 23
byte diadasemana = 1; // Valores de 0 a 6 (0=Domingo, 1 = Segunda...)
byte diadomes = 01; // Valores de 1 a 31
byte mes = 8; // Valores de 1 a 12
byte ano = 16; // Valores de 0 a 99
Wire.beginTransmission(DS1307_ADDRESS);
// Stop no CI para que o mesmo possa receber os dados
Wire.write(zero);

// As linhas abaixo escrevem no CI os valores de
// data e hora que foram colocados nas variaveis acima
Wire.write(ConverteParaBCD(segundos));
Wire.write(ConverteParaBCD(minutos));
Wire.write(ConverteParaBCD(horas));
Wire.write(ConverteParaBCD(diadasemana));
Wire.write(ConverteParaBCD(diadomes));
Wire.write(ConverteParaBCD(mes));
Wire.write(ConverteParaBCD(ano));
Wire.write(zero); //Start no CI
Wire.endTransmission();
}

byte ConverteParaBCD(byte val)
{
// Converte o número de decimal para BCD
return ( (val/10*16) + (val% 10) );
}

byte ConverteparaDecimal(byte val)
{
// Converte de BCD para decimal
return ( (val/16*10) + (val% 16) );
}

void Mostrarelogio()
{
Wire.beginTransmission(DS1307_ADDRESS);
Wire.write(zero);
Wire.endTransmission();
Wire.requestFrom(DS1307_ADDRESS, 7);
}

```

```

int segundos = ConverteparaDecimal(Wire.read());
int minutos = ConverteparaDecimal(Wire.read());
int horas = ConverteparaDecimal(Wire.read() & 0b111111);
int diadosemana = ConverteparaDecimal(Wire.read());
int diadomes = ConverteparaDecimal(Wire.read());
int mes = ConverteparaDecimal(Wire.read());
int ano = ConverteparaDecimal(Wire.read());
// Imprime mensagem na primeira linha do display
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("----- UNISINOS -----");

// Mostra a hora atual no display
lcd.setCursor(11, 2);
if (horas < 10)
{lcd.print("0");}
lcd.print(horas);
lcd.print(":");
if (minutos < 10)
{lcd.print("0");}
lcd.print(minutos);
lcd.print(":");
if (segundos < 10)
{lcd.print("0");}
lcd.print(segundos);

// Mostra a data atual no display
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("Data : ");
lcd.setCursor(7,3);
if (diadomes < 10)
{lcd.print("0");}
lcd.print(diadomes);
lcd.print(".");
if (mes < 10)
{lcd.print("0");}
lcd.print(mes);
lcd.print(".");
lcd.print(ano);

////////// TEMPORARY TEST VARIABLES //////////
int TheYear = ano;
int TheMonth = mes;
int TheDay = diadomes;
double dAzimuth;
double dElevation;
double dZenithAngle;
double TheHour = horas; /* UTC TIME! */
double TheMinute = minutos;
double TheSeconds = segundos;
double YourLongitude = -51.150283; // your longitude [e.g 151.857964];

```

```

double YourLatitude = -29.7549941; // your latitude [e.g -33.579265];

}
float EOT1 = 0.0002087*cos((360.0*0.0*daynum)/365.25);
float EOT2 = 0.0092869*cos((360.0*1.0*daynum)/365.25) -
0.12229*sin((360.0*1.0*daynum)/365.25);
float EOT3 = (-1.0)*0.052258*cos((360.0*2.0*daynum)/365.25) -
0.15698*sin((360.0*2.0*daynum)/365.25);
float EOT4 = (-1.0)*0.0013077*cos((360.0*3.0*daynum)/365.25) -
0.0051602*sin((360.0*3.0*daynum)/365.25);
float EOT5 = (-1.0)*0.0021867*cos((360.0*4.0*daynum)/365.25) -
0.0029823*sin((360.0*4.0*daynum)/365.25);
float EOT6 = (-1.0)*0.000151*cos((360.0*5.0*daynum)/365.25) -
0.00023463*sin((360.0*5.0*daynum)/365.25);
float EOT = 60.0*(EOT1+EOT2+EOT3+EOT4+EOT5+EOT6);
//float xfractiondeg = 360.0*(daynumber -1)/(365.242);
//float xfraction = xfractiondeg*PI/180.0;
//float EOT = 0.258*cos(xfraction)-7.416*sin(xfraction)-3.648*cos(2*xfraction)-
9.228*sin(2*xfraction);
float LC = (51.150283-30.0)/15.0;
float LCT = Hourval + Minuteval/60.0 + Secondval/3600.0;
float solartime = LCT + (EOT/60.0) + LC;
Serial.print("Solar time: ");Serial.println(solartime);
float phi = -29.7549941*PI/180.0;
float omega = 15.0*(solartime-12.0)*PI/180.0;
float delta = asin(0.39795*cos(0.98563*(daynumber-173.0)*PI/180.0));
float alpha = asin(sin(delta)*sin(phi)+cos(delta)*cos(omega)*cos(phi));
float zenith = (PI/2.0)-alpha;
float azimuthtemp = acos((sin(delta)*cos(phi)-cos(delta)*cos(omega)*sin(phi))/cos(alpha));
float azimuth = 0.0;
if (sin(omega)>0.0)
{
azimuth = 2.0*PI - azimuthtemp;
}
else if (sin(omega) <= 0.0)
{
azimuth = azimuthtemp;
}

helios.calcSunPos(TheYear, TheMonth, TheDay, TheHour, TheMinute, TheSeconds,
YourLongitude, YourLatitude);

Serial.print("Sun Zenith Angle: "); // Degrees down from vertical
dZenithAngle=helios.dZenithAngle;
Serial.println(helios.dZenithAngle);
Serial.print("Sun Azimuth Angle: "); // Degrees from north
dAzimuth=helios.dAzimuth;
Serial.println(helios.dAzimuth);
Serial.print("Sun Elevation Angle: "); // Degrees up from horizontal
dElevation=helios.dElevation;

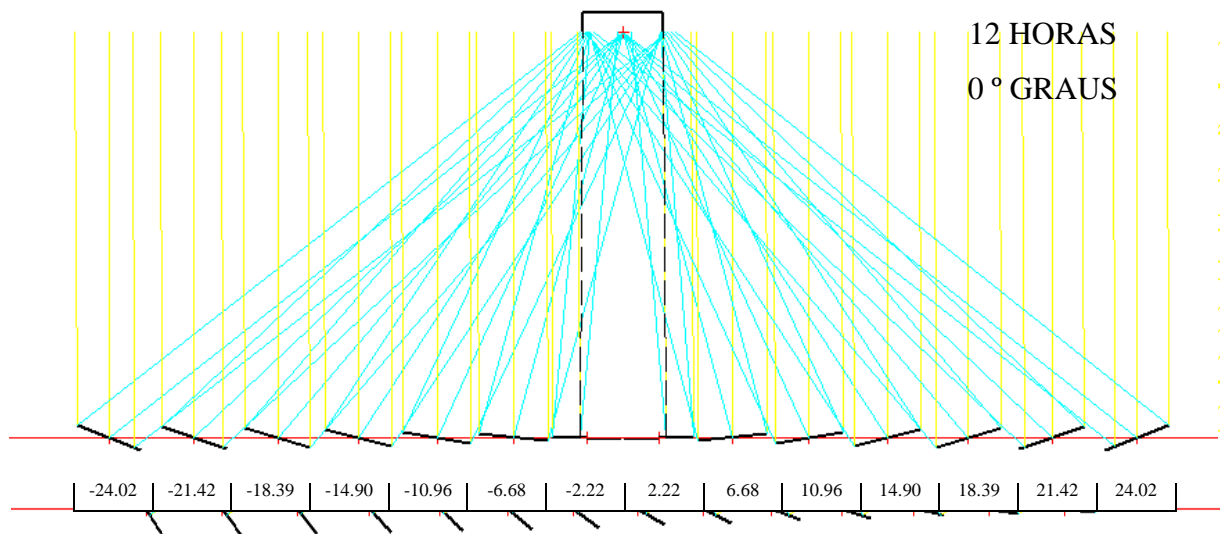
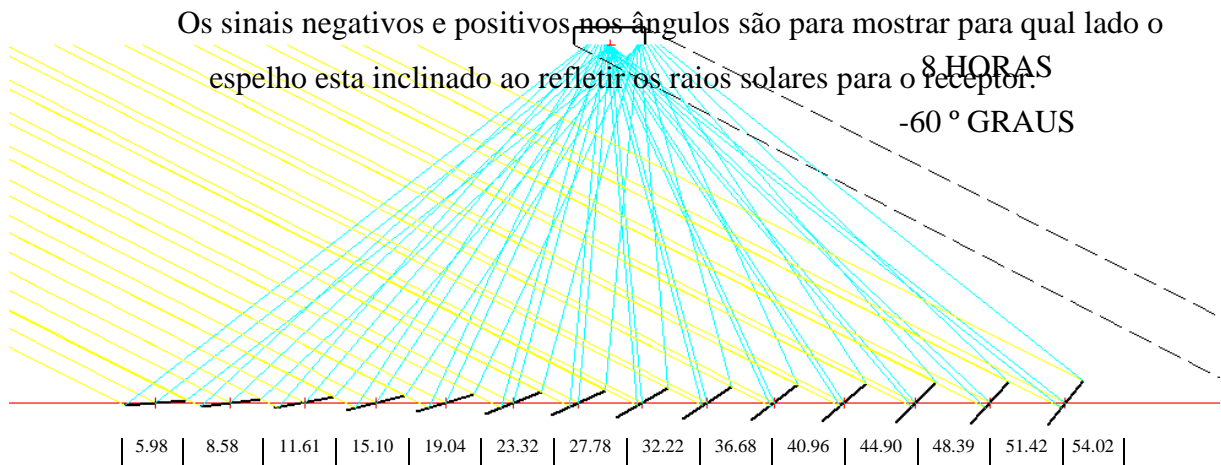
```

```

Serial.println(helios.dElevation);
delay(500);
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Az: ");
  lcd.setCursor(4,1);
  lcd.print(dAzimuth);
  lcd.setCursor(11,1);
  lcd.print("Ze: ");
  lcd.setCursor(14,1);
  lcd.print(dZenithAngle);
  lcd.setCursor(0,2);
  lcd.print("El: ");
  lcd.setCursor(4,2);
  lcd.print(dElevation);

```

APÊNDICE C – ÂNGULOS NEGATIVOS E POSITIVOS PARA A INCLINAÇÃO DOS ESPELHOS: 14 FILEIRAS – ESPELHOS DE 0,30 M – ALTURA DO RECEPTOR 2M.



16 HORAS
60 ° GRAUS

-54.02	-51.42	-48.39	-44.90	-40.96	-36.68	-32.22	-27.78	-23.32	-19.04	-15.10	-11.61	-8.58	-5.98
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	-------	-------