

ISABEL KODAMA CORREA DE MORAES

**EFEITO DA SAZONALIDADE NA IMAGEM FOCAL DE
CONCENTRADORES SOLARES DO TIPO SCHEFFLER**

São Paulo
2024

ISABEL KODAMA CORREA DE MORAES

**EFEITO DA SAZONALIDADE NA IMAGEM FOCAL DE
CONCENTRADORES SOLARES DO TIPO SCHEFFLER**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Ciências.

Versão Corrigida

São Paulo
2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 15 de Janeiro de 2024

Assinatura do autor: Isabel Kodama C. de Moraes

Assinatura do orientador: Flávio Augusto Langoski Swiech

Catálogo-na-publicação

Moraes, Isabel Kodama Correa de
Efeito da sazonalidade na imagem focal de concentradores solares do tipo Scheffler / I. K. C. Moraes -- versão corr. -- São Paulo, 2024.
112 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Energia solar 2.Concentrador de Scheffler 3.Fator de interceptação
4.Variação sazonal 5.Fluxo de energia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

ISABEL KODAMA CORREA DE MORAES

**EFEITO DA SAZONALIDADE NA IMAGEM FOCAL DE
CONCENTRADORES SOLARES DO TIPO SCHEFFLER**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
Título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:

Energia e Fluidos

Orientador:

Flávio Augusto Sanzovo Fiorelli

Versão Corrigida

São Paulo
2024

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caracterização da imagem formada por um concentrador de Scheffler de 2 m^2 no equinócio em relação à variação da declinação solar ao longo do ano para auxiliar em projetos de receptores mais eficientes. Os concentradores de Scheffler possuem a característica de manter o seu foco e estrutura fixos conforme a declinação solar e o azimute variam. Essa condição é garantida por possuir dois eixos de rastreamento e uma superfície refletora flexível, cuja geometria corresponde à seção lateral de um paraboloide delimitada por uma moldura elíptica. As análises se basearam em modelo matemático e dados de experimentos mensais realizados durante um ano. A calibração do sistema foi feita pelo método indireto que utiliza uma câmera digital e uma placa lambertiana, e os valores dos pixels foram relacionados à média histórica de DNI aferida por um pireliômetro no intervalo de uma hora em torno do meio-dia solar. As curvas teóricas referentes à área de abertura do concentrador apresentaram um comportamento cíclico em que o valor mínimo foi de $1,24 \text{ m}^2$ próximo ao solstício de Capricórnio e o máximo foi de $2,74 \text{ m}^2$ próximo ao solstício de Câncer. A área do núcleo apresentou um comportamento semelhante e variou no intervalo de $3,0 \text{ cm}^2$ a $7,9 \text{ cm}^2$. As simulações mostraram que a elevação do ângulo de abertura do cone de reflexão levou ao aumento da área da imagem. Considerando os resultados teóricos e experimentais, encontrou-se um ângulo óptico de abertura médio para o concentrador estudado de $55,5 \text{ mrad}$. Observou-se um comportamento semelhante entre as curvas da potência incidente no núcleo e da proporção entre as áreas do núcleo e fronteira. No núcleo, a potência variou de $280,2 \text{ W}$ a $1.508,5 \text{ W}$, e o fator de interceptação de 28% a 76% . Na fronteira, a potência foi de $974,9 \text{ W}$ a $1.907,9 \text{ W}$, e o fator de interceptação de 79% a 100% . Em ambas as regiões, as potências mínimas ocorreram no experimento de novembro, e as máximas no de agosto. O pico do fluxo de energia incidente no foco variou de $165,8 \text{ kW/m}^2$ a $382,5 \text{ kW/m}^2$. De modo geral, os picos mínimos ocorreram próximos ao solstício de dezembro e os máximos próximos aos equinócios. Uma parcela de fluxo de energia deslocada do centro foi observada nas distribuições próximas ao solstício de junho, que contribuiu para a redução da intensidade do pico nessas datas. A razão de concentração de energia depende do DNI, da área de abertura do concentrador, dos ajustes e dos processos construtivos. Os resultados experimentais apresentaram concordância com o funcionamento teórico do concentrador de Scheffler e podem ser utilizados em projetos de dimensionamento de receptores.

Palavras-Chave – Energia solar, Concentrador de Scheffler, Fator de interceptação, Variação sazonal, Fluxo de energia.

ABSTRACT

This paper presents a study of characterization of the image formed by a 2 m² Scheffler concentrator at the equinox in relation to the solar declination variation throughout the year to assist in more efficient receiver designs. Scheffler concentrators have the characteristic of keeping their focus and structure fixed as solar declination and azimuth vary. This condition is achieved by having two tracking axes and a flexible reflecting surface, whose geometry corresponds to the side section of a paraboloid bounded by an elliptical frame. The analyses were based on a mathematical model and data from monthly experiments performed for one year. The system calibration was by the indirect method using a digital camera and a Lambertian target, and the pixel values were related to the historical average DNI measured by a pyrethrometer at one-hour interval around solar midday. The theoretical curves referring to the concentrator aperture area had a cyclic behavior in which the minimum value was 1.24 m² near the Capricorn solstice and the maximum value was 2.74 m² near the Cancer solstice. The nucleus area had a similar behavior and varied in the range of 3.0 cm² to 7.9 cm². The simulations showed that raising the opening angle of the reflection cone causes the image area to increase. Considering the theoretical and experimental results, an average optical opening angle for the studied concentrator was found to be 55.5 mrad. Similar behavior was observed between the curves of the energy flux in the nucleus and the ratio between the nucleus and boundary areas. In the nucleus, the flux varied from 280.2 W to 1,508.5 W, and the interception factor from 28% to 76%. In the boundary, the flux was from 974.9 W to 1,907.9 W, and the intercept factor from 79% to 100%. In both regions, the minimum flows occurred in November, and the maximum flows occurred in August. The peak incident energy flux at the focus ranged from 165.8 kW/m² to 382.5 kW/m². In general, the minimum peaks occurred near the December solstice and the maximum peaks near the equinoxes. A portion of energy flux displaced from the center was observed in the distributions near the June solstice, which contributed to the reduction of the peak intensity on these dates. The energy concentration ratio depends on the DNI, concentrator aperture area, settings and construction processes. The experimental results agreed with the theoretical operation of the Scheffler concentrator and can be used in receiver sizing designs.

Keywords – Solar energy, Scheffler concentrator, Interception factor, Seasonal variation, Energy flux.

LISTA DE FIGURAS

1.1	Oferta interna de energia do Brasil em 2022.	18
1.2	Mapa brasileiro de irradiação normal direta.	20
1.3	Demanda de calor na indústria brasileira em 2016.	21
2.1	Órbita da Terra em torno do Sol.	26
2.2	Ângulos solares em relação ao centro da Terra.	26
2.3	Ângulo zenital, ângulo de elevação e azimute do Sol.	27
2.4	Variação da trajetória do Sol no céu visto por um observador em -32° S.	28
2.5	Modelo sólido de um refletor de Scheffler.	30
2.6	Concentrador de Scheffler na posição do Equinócio.	30
2.7	Esquema de operação de um concentrador de Scheffler na linha do Equador posicionado ao norte do foco.	31
2.8	Orientações de um refletor de Scheffler conforme as variações sazonais em relação (a) ao eixo de rastreamento diário e (b) ao Sol.	32
2.9	Representação do SS e SN em ambos os hemisférios durante o solstício de Câncer.	33
2.10	Mecanismos dos ajustes diário e sazonal do concentrador de Scheffler estudado.	34
2.11	Variação sazonal da moldura elíptica de um concentrador de Scheffler.	34
2.12	Ajuste sazonal da área da moldura elíptica e da área de abertura de um concentrador de Scheffler.	35
2.13	Variação da área de abertura de um Scheffler conforme a declinação solar.	36
2.14	Vista no plano xy de um SS (4° quadrante) e SN (1° quadrante) em um mesmo foco no equinócio.	37
3.1	(a) Resultados numéricos e experimentais da razão de concentração no plano focal. (b) Fator de interceptação em função do raio de abertura do receptor para diferentes erros de rastreamento.	41

3.2	Distribuição bidimensional do fluxo de calor simétrico em $r = 0$ mm.	42
3.3	Distribuição do fluxo no plano focal para os diferentes erros de rastreamento e DNI = 1000 W/m^2	43
3.4	a) Fluxo de radiação no plano focal. b) Áreas delimitadas no plano focal.	44
3.5	Fluxo solar na superfície dos tubos de um absorvedor de cavidade.	45
3.6	Projeção do foco a partir da deformação uniforme da superfície do refletor. O foco teórico se concentra depois do plano focal (yz) nas imagens superiores e antes do plano focal nas imagens inferiores.	46
3.7	Distribuição gaussiana dos feixes no plano de projeção conforme se distanciou do plano focal teórico, em que 2σ é o desvio padrão da distribuição de Gauss.	46
4.1	Comparação dos perfis médios de CSR.	48
4.2	Esquema no plano xy da formação da imagem de um concentrador de Scheffler no equinócio.	49
4.3	Esquema no plano xz da formação da imagem de um concentrador de Scheffler no equinócio.	50
4.4	(a) Variação da fronteira da imagem (D_f) de um SS. (b) Variação do núcleo da imagem (d_o) de um SS.	52
4.5	Estrutura composta por receptor, alvo lambertiano e radiômetro utilizada para a medição da radiação do concentrador solar.	54
4.6	(a) Fotografia em escala de cinza da energia solar concentrada no alvo lambertiano (b) Distribuição do fluxo de energia solar concentrada no alvo lambertiano para uma irradiância de 690 kW/m^2 . (c) Função de calibração da escala de cinza.	54
4.7	Configuração dos equipamentos utilizados no experimento.	55
4.8	Sobreposição das fotografias do alvo gerado pelas lâmpadas quando a potência aplicada em cada uma foi de 2 kWe.	55
4.9	Contorno do fluxo obtido pelo método de medição indireto modificado quando a potência aplicada em cada lâmpada foi de 2 kWe.	56

4.10	Distribuições de fluxo do simulador nos eixos x e y para as diferentes potências totais de entrada ($P_{ent,tot}$).	57
4.11	Pratos solares durante os testes lunares: (a) prato solar com 33 facetas elípticas e (b) prato solar com 6 facetas elípticas.	57
4.12	Distribuição do fluxo no plano focal do concentrador com 33 facetas.	59
4.13	Distribuição do fluxo nos eixos y e z do concentrador com 33 facetas.	59
4.14	Distribuição do fluxo no plano focal do concentrador com 6 facetas.	60
4.15	Distribuição do fluxo no plano focal do concentrador com 6 facetas.	60
4.16	Gráfico comparativo do fator de interceptação em relação à razão de concentração geométrica dos concentradores.	60
4.17	(a) Concentrador solar com 16 pratos paraboloídes. (b) Sistema de captação de dados.	61
4.18	(a) Fotografia de temperatura infravermelha do alvo lambertiano. (b) Fator de interceptação para diferentes erros de rastreamento.	62
4.19	(a) Fotografia original em escala de cinza da projeção do foco no alvo lambertiano do experimento Q1. (b) Região da energia solar concentrada isolada (em branco).	63
4.20	(a) Região do foco utilizada para a determinação do centroide. (b) Matriz da fotografia original multiplicada por um fator de combinação linear. (c) Eixos F_y e F_z do plano focal que se cruzam no centroide.	63
4.21	Comprimentos dos semieixos do núcleo e fronteira das imagens Q1, N2, K3 e N4 para um $\theta_c = 47,5$ mrad.	64
4.22	Distribuição do fluxo de energia nas imagens Q1, N2, K3 e N4.	65
4.23	Fator de interceptação das quatro imagens analisadas.	65
5.1	Vista do local do experimento ao lado (a) Oeste e (b) Leste do concentrador.	68
5.2	Vista superior do local do experimento extraída do Google Maps.	69
5.3	Representação dos ângulos de altitude e azimute do ponto de obstrução. O ponto A representa o ponto mais elevado de uma possível obstrução.	70

5.4	Diagrama de sombreamento do local de instalação do concentrador de Scheffler.	70
5.5	Bancada experimental.	71
5.6	Posicionamento dos equipamentos no local do experimento.	72
5.7	Vistas lateral e traseira do concentrador de Scheffler.	72
5.8	Mecanismo do sistema de rastreamento diário.	73
5.9	Câmera digital, lente e filtros utilizados nos experimentos.	74
5.10	Procedimento experimental.	77
6.1	Variação da área de abertura teórica de um SS de 2 m ² de abertura no equinócio em relação ao dia do ano ($1 \leq n \leq 365$).	82
6.2	Variação das dimensões dos eixos de núcleo e fronteira da imagem ao longo do ano.	83
6.3	Variação das dimensões dos eixos de núcleo e fronteira da imagem conforme a abertura do cone de reflexão.	83
6.4	Variação da área do núcleo da imagem.	84
6.5	Variação da área da fronteira da imagem.	84
6.6	Proporção entre as áreas do núcleo e da fronteira da imagem.	85
6.7	Distribuição dos valores dos pixels no foco projetado no alvo lambertiano.	86
6.8	(a) Fotografia original em escala de cinza. (b) Fotografia após o comando <i>im2bw</i>	88
6.9	Zona focal obtida após o comando <i>bwselect</i>	88
6.10	Fotografia após o comando <i>imlincomb</i>	89
6.11	Eixos F_y e F_z sobre a matriz da zona focal.	89
6.12	Fator de interceptação conforme a abertura circular de um receptor posicionada no plano focal para os diferentes meses do ano.	90
6.13	Curva anual do fator de interceptação na zona focal para um θ_b de 38,3 mrad.	91
6.14	Potência incidente nas regiões do foco.	95
6.15	Potência incidente no plano focal e irradiação solar horária média entre 11h30 e 12h30.	95

6.16 Potência incidente na abertura de um receptor circular durante 1h em torno do meio-dia solar.	96
6.17 Fluxo de energia no eixo y da imagem.	97

LISTA DE TABELAS

1	Aplicações de concentradores de Scheffler.	39
2	Medidas do local do experimento.	69
3	Distâncias médias extraídas do local do experimento.	71
4	Incertezas dos instrumentos de medição.	76
5	Dimensões da imagem para um θ_b igual a 38,3 mrad.	91
6	Irradiação solar direta próximo ao meio-dia solar.	92
7	Área de abertura do concentrador, potência incidente, fator de interceptação, fluxo máximo de energia e razão de concentração de energia no foco do concentrador estudado.	94

LISTA DE ABREVIACÕES

CCD	<i>Charge-coupled device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Semiconductor</i>
DNI	Irradiação Normal Direta
EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
IAG-USP	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
RGB	<i>Red, green, blue</i>
SN	Concentrador de Scheffler Norte
SS	Concentrador de Scheffler Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos gregos

α	Ângulo entre o semi-eixo maior do refletor Scheffler e o eixo de rastreamento diário [°]
α_F	Abertura angular [°]
α_n	Inclinação da parábola do refletor de Scheffler conforme o dia do ano [°]
α_s	Ângulo de elevação solar [°]
γ	Fator de interceptação [-]
γ_s	Azimute [°]
δ	Declinação solar [rad]
δ_{alu}	Incerteza devido à luminosidade [-]
δ_{G_f}	Incerteza do fluxo de radiação [-]
δ_{pir}	Incerteza do pireliômetro [-]
δ_{sccc}	Incerteza do ruído [-]
δ_{tr}	Erro de rastreamento [mrad]
δ_ζ	Incerteza da medição da área morta do refletor [-]
ζ_{ap}	Fator de área útil [-]
η_{opt}	Eficiência óptica conforme o erro de rastreamento [mrad]
θ	Meio ângulo de abertura do cone óptico [mrad]
θ_z	Ângulo zenital [°]
ρ_e	refletividade [-]
σ, σ_{se}	Erro de rastreamento [mrad]
Φ	Latitude [°]
ϕ	Latitude local [°]
ϕ_{wy}	Ângulo entre o feixe refletido e a direção positiva de F_y [°]
ϕ_{wz}	Ângulo entre o feixe refletido e a direção positiva de F_z [°]
ω	Ângulo horário [°]

Símbolos romanos

A	Área [m ²]
$a_{s,n}$	Semieixo menor da moldura elíptica [m]
B	Variável do cálculo da declinação solar [rad]
$b_{s,n}$	Semieixo maior da moldura elíptica [m]
C	Razão de concentração geométrica [-]
$C_{ab,n}$	Coefficiente linear da reta que passa pelos pontos A e B do concentrador [m]
$C_{mp,n}$	Coefficiente linear da reta que passa pelos pontos M e P do concentrador [m]
$C_{p,n}$	Coefficiente linear da reta tangente no ponto P do concentrador no dia n [m]
C_{NSE}	Fração de energia solar [-]
C_g	Razão de concentração geométrica [-]
CSR	Razão circunsolar [-]
d	Distância entre dois pontos [m]
D_f	Diâmetro da fronteira da imagem [mm]
d_o	Diâmetro do núcleo da imagem [mm]
E	Valor em escala de cinza [-]
F_{cinza}	Fator de cinza [W]
f	Distância focal [m]
f_e	Distância entre o ponto de reflexão e o foco nominal [m]
G_f	Fluxo de energia [W/m ²]
g_{Gardon}	Fluxo de energia medido pelo sensor de Gardon [kW/m ²]
g_i	Fluxo de energia em um pixel [kW/m ²]
$g_{on,i}$	Valor de cinza médio no pixel i quando o simulador está ligado [-]
$g_{off,i}$	Valor de cinza médio no pixel i quando o simulador está desligado [-]
h	Altura [m]
I	Irradiância [W/m ²]
I_T	Irradiação total [Wh/m ²]
k	Razão entre o fluxo de calor e o valor de cinza linear [kW/m ²]
$m_{mp,n}$	Coefficiente angular da reta que passa pelos pontos M e P do concentrador no dia n [-]
$m_{ab,n}$	Coefficiente angular da reta que passa pelos pontos A e B do concentrador no dia n [-]

$m_{p,n}$	Coefficiente angular da reta tangente no ponto P do concentrador no dia n [-]
N	Quantidade de pixels [-]
N_L	Quantidade de lâmpadas [-]
n	Dia do ano ($1 < n < 365$)
P	Potência solar incidente [W/pixel]
$V_{cinza,i,j}$	Valor da intensidade de um pixel em escala de cinza [-]
W_y	Eixo da imagem sobre o eixo y [mm]
W_z	Eixo da imagem sobre o eixo z [mm]
w_y	Semieixo da imagem sobre o eixo F_y [mm]
w_z	Semieixo da imagem sobre o eixo F_z [mm]
x	Coordenada x [m]
y	Coordenada y [m]

Subíndices

a	Ponto A
ab	Abertura do receptor
ap	Abertura do concentrador
b	Estrutura do concentrador
b	Ponto B
C	Câmera
CS	Auréola solar
c	Reflexão
e	Superfície do refletor não espelhada
fe	Ponto de reflexão
$Gardon$	Sensor de Gardon
$i, pixel$	Pixel
m	Espelhos do concentrador
max	Máximo
min	Mínimo
n	Dia do ano
P	Pivô central
p	Ponto P

real Real
refl Abertura efetiva
s Moldura elíptica
S Sol ou disco solar

SUMÁRIO

1	Introdução e objetivos	17
1.1	Objetivo Geral	21
1.2	Objetivos Específicos	22
1.3	Estrutura do trabalho	22
2	Coletores solares	24
2.1	Relações geométricas dos feixes solares	25
2.2	Concentradores de Scheffler	29
2.2.1	Aspectos geométricos e operacionais de concentradores de Scheffler	29
2.2.2	Aplicações de concentradores de Scheffler	38
3	Caracterização da região focal e do fluxo de energia de concentradores	40
4	Formação da imagem e medição do fluxo de energia na zona focal	47
4.1	Formação da imagem em concentradores de Scheffler	47
4.2	Medição do fluxo de energia na zona focal	52
5	Análise experimental	68
5.1	Determinação do local do concentrador	68
5.2	Bancada Experimental	70
5.2.1	Concentrador de Scheffler	71
5.2.2	Alvo lambertiano	73
5.2.3	Câmera digital	74
5.3	Pireliômetro	75

5.4	Procedimento experimental	75
5.5	Incertezas de medições	76
6	Resultados	81
6.1	Área de abertura do concentrador e dimensões da imagem	81
6.2	Potência incidente e fluxo de energia na imagem	85
7	Conclusões	98
8	Sugestões de trabalhos futuros	100
	Referências	101
	Apêndice A – Código para o processamento das fotografias no Matlab	106

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O crescimento econômico e a qualidade de vida estão fortemente vinculados ao consumo de energia, a qual tem sido tratada como um recurso estratégico. A segurança energética se tornou um assunto de grande relevância no mundo, devido ao fato de o desenvolvimento econômico depender da disponibilidade de energia a custos competitivos e em quantidade e qualidade adequadas às necessidades dos consumidores. O Brasil possui uma vantagem comparativa neste setor em relação aos demais países em razão da abundância de recursos naturais a baixo custo. Contudo, é necessário desenvolver estratégias e tecnologias, assim como caracterizá-las, para usufruir dessa posição e enfrentar os desafios para manter essa vantagem comparativa (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

A crescente preocupação com o meio ambiente reforça a importância de garantir um crescimento econômico sustentável com políticas públicas que se atenham aos impactos ambientais gerados na produção e no uso da energia e assegurem uma disponibilidade energética adequada. O desenvolvimento econômico do Brasil demanda uma quantidade significativa de energia e um elevado grau de segurança e sustentabilidade no seu manejo. Nesse aspecto, o país apresenta condições promissoras quanto aos recursos energéticos renováveis e às tecnologias para transformá-los em energia (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007).

A matriz energética brasileira se destaca com um percentual de 47,4% de energia renovável (figura 1.1), quando comparada com 14,1% referentes a esta mesma parcela do restante do mundo. Na matriz elétrica brasileira, a fonte hidráulica é responsável por 61,9% (EPE, 2023) e possui um papel substancial na produção e no abastecimento de energia a baixo custo. Essa fonte renovável se destaca dentre as demais por permitir a distribuição da energia com rapidez e a qualquer momento, o que possibilita que as concessionárias equilibrem as oscilações de carga no sistema de distribuição elétrica. Contudo, existe a tendência de países mais desenvolvidos diminuírem a construção de grandes hidrelétricas, ao contrário das nações em desenvolvimento como o Brasil (MORAN et al., 2018).

As consequências hidrológicas das grandes barragens são extensas. As mudanças sazonais na

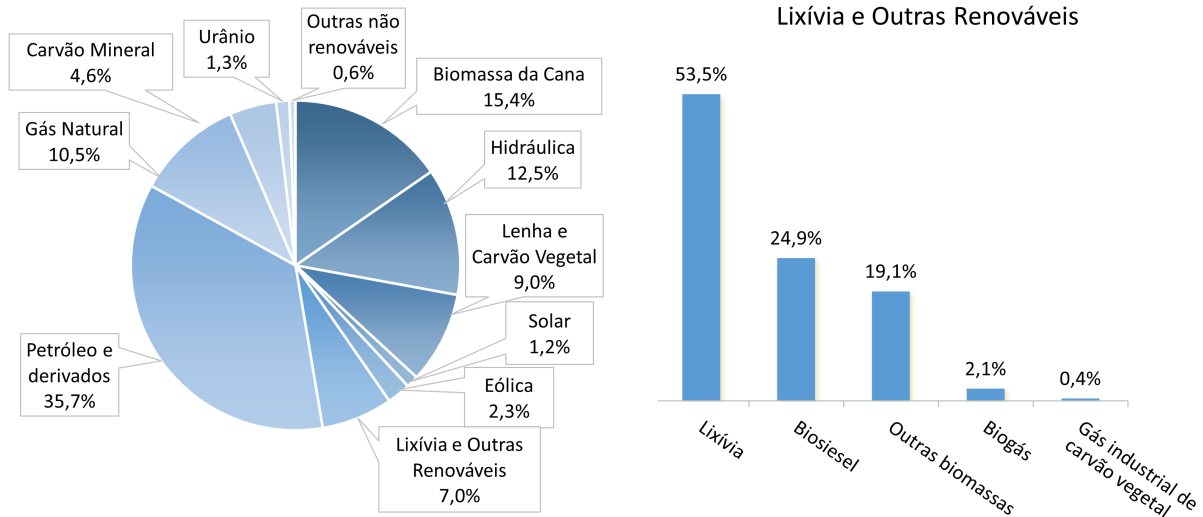


Figura 1.1: Oferta interna de energia do Brasil em 2022.
Fonte: EPE (2023).

descarga do rio afetam de forma negativa o ecossistema em sua composição, elevam a concentração de poluentes e alteram os níveis de precipitação, os quais interferem diretamente na geração da energia hidroelétrica. Os impactos sociais e econômicos, os efeitos do uso da terra e os custos de desativação da barragem após a vida útil muitas vezes não são incorporados aos projetos em sua totalidade, podendo ser capazes de inviabilizar a própria construção. É importante que a energia hidrelétrica faça parte de um futuro sustentável combinada com diversificadas fontes de energia como a eólica, solar e biomassa (MORAN et al., 2018).

A grande dependência desse recurso pode comprometer a segurança energética que é alcançada pela diversificação das fontes de abastecimento (VIEIRA; ZAPPAROLI; CALDARELLI, 2019). Em períodos de seca, os níveis dos reservatórios das hidrelétricas ficam mais baixos e há a necessidade de acionar termelétricas, o que eleva os custos de operação de todos os subsistemas do Sistema Interligado Nacional (VERDÉLIO, 2018). Outras formas de energias renováveis possuem uma capacidade de crescimento de produção mais elevada que a hidrelétrica por terem sido menos exploradas (SULYOK, 2014).

O aumento da disponibilidade de energia é essencial para o desenvolvimento (GOLDEMBERG, 1998). Uma outra estratégia para elevar a sua oferta é utilizar os recursos energéticos de modo mais eficiente (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007). A ampliação da oferta de energia muitas vezes não está associada ao uso racional. Todos os processos de transformação e distribuição estão associados a perdas que ocorrem desde as centrais de transformação até os equipamentos de uso final. Há casos em que a substituição da fonte ou do produto energético resulta

em maior economia de energia primária do que quando apenas se eleva a eficiência dos equipamentos, como ocorre na substituição da geração de eletricidade mediante a produção de calor a partir da energia química. Países como a Alemanha, Inglaterra, Rússia e China priorizam a eletricidade para finalidades que exigem uma energia mais ordenada como a força motriz e a iluminação. Nesses países, as fontes de energia química são priorizadas para abastecer as demandas térmicas (STRAPASSON, 2004).

O Brasil tem se destacado na busca por diversificar a sua matriz energética, de modo a reduzir a dependência de combustíveis fósseis e tornar mais segura a sua base de abastecimento. O uso eficiente da energia e o desenvolvimento de tecnologias direcionadas para as fontes renováveis são essenciais neste processo. Uma política energética baseada no desenvolvimento sustentável deve assegurar o suprimento por meio da diversificação das fontes, do uso de novas tecnologias e da descentralização da produção de energia, além de utilizar racionalmente os seus recursos de forma eficiente e com o menor custo e atentar-se aos impactos sociais e ambientais em todos os processos de extração, produção, transmissão, distribuição, armazenamento e uso da energia (VIEIRA; ZAPPAROLI; CALDARELLI, 2019).

Essa política vai de acordo com a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) desenvolvida para o aprimoramento de políticas públicas que visam erradicar a pobreza e melhorar a qualidade de vida. Com base neste propósito, foram estipulados os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) para serem alcançados até o ano de 2030. A ODS 7 fomenta o acesso universal, confiável, moderno e a preço acessível aos serviços de energia. No caso do Brasil, foi proposto manter elevada a participação da energia renovável na matriz energética, elevar a taxa da eficiência energética da economia, reforçar a cooperação internacional para promover o acesso à pesquisa e tecnologias de energia renovável, eficiência energética e tecnologias de combustíveis fósseis avançadas e mais limpas, promover e expandir o investimento em infraestrutura de energia e em tecnologia de energia limpa e, por fim, aprimorar a tecnologia para o fornecimento de serviços de energia modernos e sustentáveis de modo universal (LEÃO, 2019).

Há um enorme potencial de geração de energia a partir de fontes alternativas, porém estas são subutilizadas em razão da competitividade dos combustíveis comerciais de baixo custo e das dificuldades de armazenamento por esses recursos serem difusos e dependerem do clima e do tempo. Por outro lado, além de serem renováveis e gerarem menor impacto ambiental, o seu custo é mais previsível, e, portanto, são economicamente e politicamente mais seguras quando comparadas com as fontes convencionais. A redução de preços nas últimas décadas e os incentivos governamen-

tais voltados para as questões de mudanças climáticas têm contribuído para a implementação de energia renovável em diversos setores (VIEIRA; ZAPPAROLI; CALDARELLI, 2019).

O Brasil apresenta condições favoráveis para suportar a tecnologia solar, principalmente por possuir um clima tropical com 92% do território acima do Trópico de Capricórnio (GRÁH, 2015). As elevadas pressões atmosféricas nas regiões tropicais geram condições estáveis com baixa nebulosidade e um alto índice de radiação solar durante todo o ano (HAHN et al., 2018). As taxas de irradiação incidente em qualquer região do país ultrapassam os valores encontrados na maioria dos países da União Europeia (GRÁH, 2015).

Há uma grande área com bons índices de radiação solar que se inicia no semiárido baiano e se estende até o Sul do Brasil (figura 1.2) (CASTRO, 2016). O Nordeste possui vantagens técnicas e econômicas devidas às baixas variações sazonais. Há locais em que se aproveita 3.000 horas de sol por ano nos dias com o céu aberto (GRÁH, 2015). Áreas como o oeste da Bahia se destacam por serem adequadas para a grande produção de energia solar concentrada (SULYOK, 2014).



Figura 1.2: Mapa brasileiro de irradiação normal direta.
Fonte: SOLARGIS (2019).

Há um campo de aplicação de energia solar também no setor industrial, que apresenta o maior consumo energético no Brasil. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a demanda deste setor em 2016 foi de 84,18 Mtep (equivalente a 3,5 EJ), do qual 80% foram de calor, um percentual maior que a média global de 74% (figura 1.3). A tendência é que o consumo de energia no Brasil aumente em quase todos os setores nos próximos anos em decorrência do aumento da população e do crescimento econômico (HAHN et al., 2018).

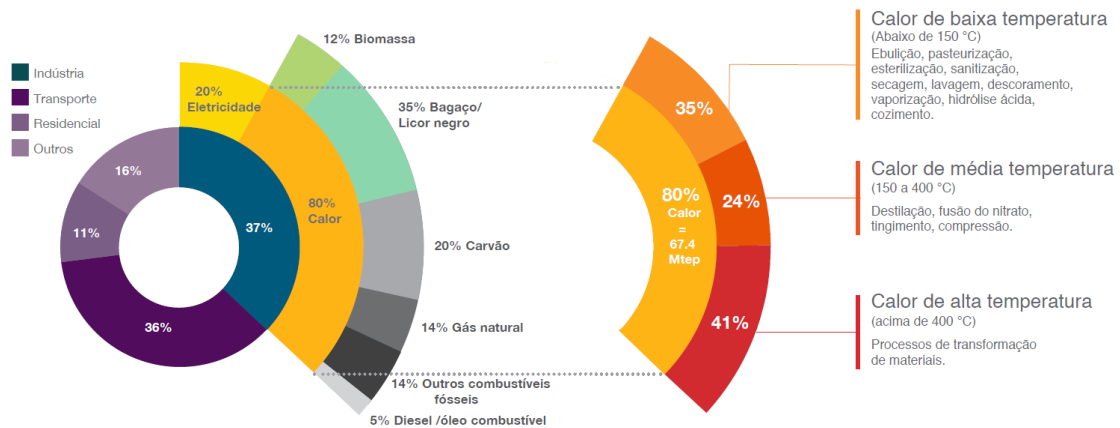


Figura 1.3: Demanda de calor na indústria brasileira em 2016.

Fonte: Hahn et al. (2018).

A região Sudeste do Brasil é a mais industrializada e coincide com uma zona favorável para a captação dos recursos solares com uma média anual próxima de 2.000 kWh/m². Da parcela de energia na forma de calor demandada pela indústria brasileira mais da metade é abastecida por fontes não renováveis. Os processos que exigem calor em até 400 °C são capazes de serem supridos por meio de tecnologias de concentração solar e correspondem a 59% da demanda total de calor (HAHN et al., 2018).

1.1 Objetivo Geral

Este estudo tem o propósito de caracterizar a imagem formada por um concentrador de Scheffler em relação à variação da declinação solar ao longo de um ano para auxiliar projetos de receptores mais eficientes. O concentrador utilizado possui uma área de abertura de projeto de 2 m² no equinócio. A análise do foco foi feita em relação à sua geometria e fluxo de energia incidente. Os dados foram obtidos em experimentos mensais pelo método indireto, em que se utilizou uma placa lambertiana e uma câmera digital. Os dados teóricos, baseados no modelo de formação da imagem de concentradores de Scheffler, foram correlacionados com os experimentais por meio do processamento das informações e calibração do sistema no EES e MATLAB.

1.2 Objetivos Específicos

As etapas necessárias para alcançar o objetivo geral foram listadas a seguir.

- Revisão do funcionamento e formação da imagem de concentradores de Scheffler;
- Revisão do procedimento de ajuste do concentrador de Scheffler;
- Revisão do método de medição da imagem focal;
- Realização de experimentos mensais ao longo de um ano;
- Simulação das dimensões do concentrador e das imagens formadas nas datas dos experimentos;
- Tratamento dos dados experimentais;
- Calibração do sistema;
- Correlação entre os dados teóricos e experimentais;
- Estimativa do erro experimental e
- Elaboração das análises e conclusões.

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho foi dividido em sete capítulos. O capítulo 2 apresenta as classificações de coletores solares e a terminologia utilizada para se referir aos componentes do concentrador. São mostradas as definições dos ângulos solares e os efeitos do movimento do Sol percebidos por um observador na Terra, os quais são importantes para se compreender os mecanismos de operação do concentrador estudado. As características geométricas dos concentradores de Scheffler, o princípio de funcionamento para se adaptar aos diferentes ângulos da luz solar e os campos de aplicação também são apresentados neste capítulo. Em seguida, o capítulo 3 aborda estudos encontrados na literatura de diferentes tecnologias de concentração que buscaram caracterizar o foco, avaliaram o efeito do erro de rastreamento e adotaram estratégias que podem ser utilizadas para compatibilizar o fluxo de energia com a capacidade de transferência de calor do fluido de trabalho.

O processo de formação da imagem de concentradores de Scheffler e a forma como o ajuste da sua superfície interfere na imagem ao longo do ano são descritos no capítulo 4, incluindo a definição dos conceitos de núcleo e fronteira utilizados nas análises do fator de interceptação e o método indireto escolhido para verificar a distribuição do fluxo de energia. Este método foi adotado por outros pesquisadores para obter as informações do fluxo de energia na imagem focal. A metodologia de aferição e calibração dos dados por meio da irradiação local aferida constam nesse mesmo capítulo. O capítulo 5 descreve o procedimento utilizado para determinar o local do concentrador, os equipamentos que compuseram a bancada experimental, o procedimento experimental empregado para a coleta de dados e a formulação utilizada na estimativa das incertezas dos resultados.

O capítulo 6 apresenta os resultados deste trabalho. São abordadas as curvas teóricas da abertura do concentrador e das dimensões da imagem obtidas por simulações a partir das datas de realização dos experimentos. Considerou-se uma faixa de 0 mrad e 40 mrad para os ângulos de desvios do concentrador na confecção dos gráficos das dimensões da imagem. Além disso, são apresentados a distribuição do fluxo de energia na zona focal obtida por experimentações, o processamento das imagens e o comportamento das curvas do fator de interceptação em relação ao aumento do diâmetro de abertura de um receptor posicionado no plano focal. Este capítulo também mostra o processo de calibração do sistema e da estimativa da potência incidente nas diferentes regiões do foco. O capítulo 7 apresenta as conclusões e sugestões de projetos que possam ser desenvolvidos a partir dos resultados obtidos no presente trabalho.

2 COLETORES SOLARES

Os coletores solares são utilizados para captar a radiação solar e absorvê-la na forma de calor. A energia é conduzida para um fluido de trabalho que a transporta até a sua aplicação. A radiação solar possui uma baixa densidade, portanto, uma grande área de cobertura da superfície incidente costuma ser necessária quando se deseja obter uma maior quantidade de radiação (PANCHAL et al., 2018). Por essa razão, uma das soluções viáveis para elevar a densidade de energia é concentrá-la em uma menor área e deste modo adquirir uma quantidade suficiente de calor para as aplicações práticas (BAJAJ; RAJ; SRINIVAS, 2016).

Os coletores são classificados como concentradores ou não concentradores. Os coletores do tipo não concentrador possuem uma superfície capaz de absorver a radiação direta e difusa do sol e não possuem meios de concentração da radiação solar incidente. Portanto, a área coletora é a mesma que a área absorvedora. Além disso, eles não necessitam de um sistema de rastreamento, o que possibilita que a sua instalação seja feita sobre uma plataforma rígida (PANCHAL et al., 2018). Geralmente são capazes de atingir temperaturas de até 80 °C, exceto no caso dos sistemas de tubo a vácuo que podem alcançar até 200 °C. Por consequência, limitam-se a aplicações de aquecimento de água residencial e comercial, aquecimento e resfriamento de edifícios e geração de calor em processos industriais (HUDON, 2014).

Os coletores do tipo concentrador são compostos por refletores ou algum outro meio óptico de concentração da energia solar incidente de uma grande área coletora para uma pequena área absorvedora. A maioria é capaz de captar apenas a radiação solar direta, em razão de a componente difusa não seguir os princípios de concentração. Alguns exemplos são as lentes de Fresnel, calhas parabólicas, torres centrais, pratos parabólicos e refletores de Scheffler. A concentração da radiação permite que se atinja temperaturas mais elevadas, o que viabiliza a utilização desses concentradores em fogões solares, para a geração de eletricidade quando associados a uma turbina ou um motor Stirling, processos de dessalinização, cremação e diferentes campos de aplicações industriais (PANCHAL et al., 2018).

Além dessa classificação, o concentrador pode ser chamado de formador de imagem, quando

a imagem óptica da fonte de radiação é projetada no receptor. Caso contrário, é conhecido como não formador de imagem. Os concentradores formadores de imagem podem gerar um foco pontual com elevada razão de concentração, como ocorre nos concentradores parabólicos, ou um foco linear com razão de concentração inferior, como no caso dos concentradores parabólicos de passagem (CHAUHAN et al., 2021).

A terminologia adotada neste trabalho foi a mesma considerada por Duffie e Beckman (2013) e Dib (2021). A palavra coletor se refere ao sistema completo composto pelo concentrador e receptor. O concentrador é constituído pelo refletor, sistema de rastreamento e as estruturas de sustentação. O receptor é o sistema que absorve a radiação solar e a converte em uma outra forma de energia e corresponde ao conjunto do absorvedor, sua cobertura e seu isolamento.

2.1 Relações geométricas dos feixes solares

Os mecanismos de operação dos concentradores foram desenvolvidos com base no movimento do Sol em relação à Terra. Esta seção foi dedicada para a definição dos ângulos solares e apresentação dos efeitos do movimento solar percebidos por um observador na superfície terrestre. Esses conceitos são importantes para a compreensão do funcionamento dos concentradores de Scheffler, mostrado posteriormente na seção 2.2.

A Terra realiza um movimento de rotação simultâneo em torno do eixo polar e de translação em torno do Sol. A linha do Equador está inclinada $23,5^\circ$ em relação ao plano orbital, como mostrado na figura 2.1. Essa inclinação altera o paralelo da Terra que recebe a radiação direta do Sol ao meio-dia solar¹ ao longo do movimento de translação e é responsável pelas estações do ano. Os solstícios de junho e dezembro ocorrem quando os feixes solares incidem diretamente sobre os Trópicos de Câncer e Capricórnio, respectivamente, e os equinócios de março e setembro, quando os feixes incidem sobre a linha do Equador (SARAIVA; OLIVEIRA-FILHO; MÜLLER, 2010). Assim, as estações são definidas como:

- Equinócio de março: primavera no hemisfério norte e outono no hemisfério sul;
- Solstício de junho: verão no hemisfério norte e inverno no hemisfério sul;
- Equinócio de setembro: outono no hemisfério norte e primavera no hemisfério sul e

¹Meio-dia solar: momento em que o Sol atinge a sua maior latitude no dia.

- Solstício de dezembro: inverno no hemisfério norte e verão no hemisfério sul.

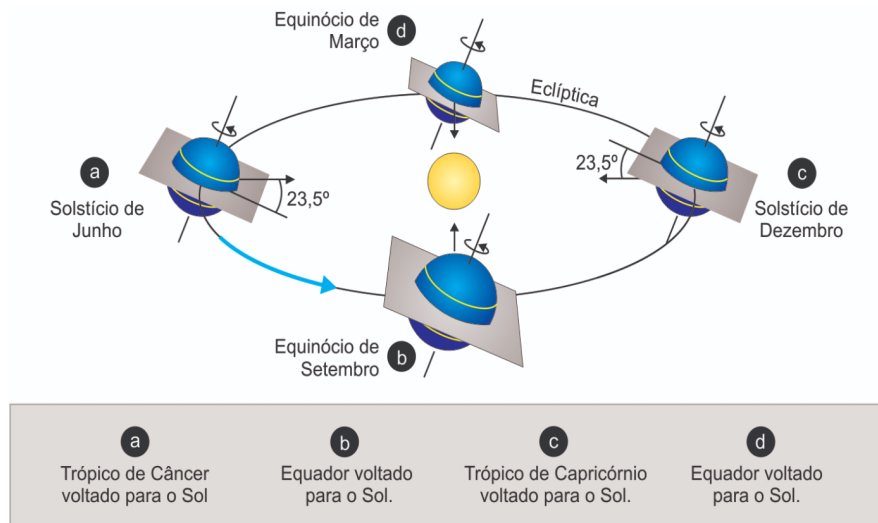


Figura 2.1: Órbita da Terra em torno do Sol.
Fonte: Saraiva, Oliveira-Filho e Müller (2010).

Do ponto de vista da figura 2.2, considera-se que um observador se encontra no ponto O e os feixes solares, paralelos entre si, incidem sobre a superfície da Terra. A latitude (Φ) é definida como o ângulo entre o plano do Equador e a normal da superfície em O. A latitude varia de -90° no Polo Sul a 90° no Polo Norte e vale 0° na linha do Equador. A declinação solar (δ) corresponde ao ângulo formado entre o plano do Equador e os feixes solares. Este ângulo varia de $-23,5^\circ$ no solstício de Capricórnio a $23,5^\circ$ no solstício de Câncer. O ângulo horário (ω) se forma entre o meridiano do observador e o meridiano paralelo aos raios do Sol. Por convenção, é negativo pela manhã, positivo à tarde e zero ao meio-dia solar (GRÁH, 2015).

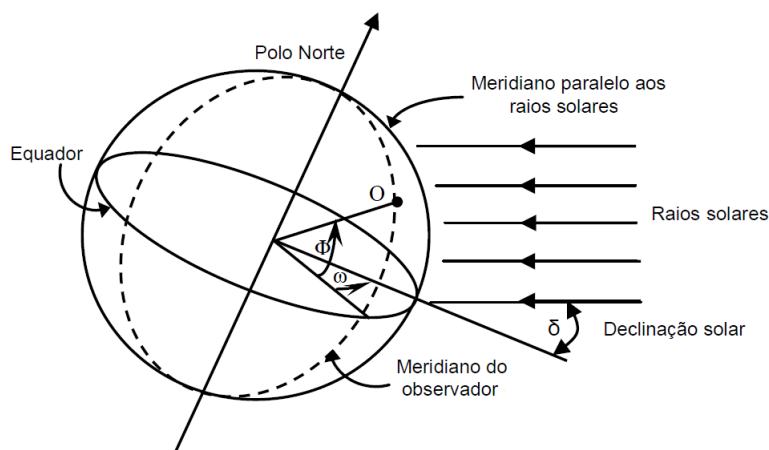
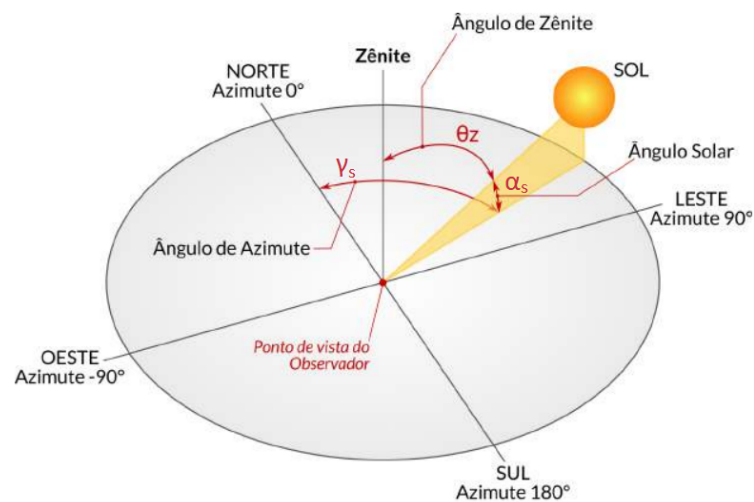


Figura 2.2: Ângulos solares em relação ao centro da Terra.
Fonte: Adaptado de Gráh (2015).

Este trabalho utiliza a hora solar ao se referir à hora baseada no movimento angular aparente do Sol no céu. O meio-dia solar é o momento em que o Sol atravessa o meridiano do observador. O Sol percorre 1° de longitude em 4 minutos. A hora solar não coincide com a hora do relógio local. A diferença entre elas pode ser ainda maior quando adotado o horário de verão (DUFFIE; BECKMAN, 2013). Outra convenção deste trabalho diz respeito ao Norte. A direção Norte é referida ao Norte geográfico da Terra e não ao magnético.

No referencial de um observador na Terra (ponto O), o movimento diário e sazonal do Sol é constatado por meio das variações dos ângulos zenital, de elevação e azimutal (ou azimute) (figura 2.3). O ângulo zenital (θ_z) corresponde ao ângulo de incidência do feixe de radiação sobre uma superfície horizontal. Ele varia entre a faixa de 0° a 90° quando o Sol está acima do horizonte de acordo com a declinação e o horário solar. O ângulo de elevação (α_s) é a altura angular do Sol em relação ao horizonte celestial, ou seja, é o complemento do ângulo zenital. O seu pico é atingido ao meio-dia solar e é maior no verão do que no inverno. O azimute (γ_s) é definido como a abertura angular da projeção do feixe de radiação no plano horizontal em relação ao Norte. O azimute é negativo antes do meio-dia e positivo após o meio-dia.



(NORTE = Azimute 0° quando o observador se encontra no hemisfério Sul)

Figura 2.3: Ângulo zenital, ângulo de elevação e azimute do Sol.
Fonte: Adaptado de Pereira et al. (2017).

As posições do nascente e poente dependem da declinação solar, cuja variação altera a trajetória do Sol vista por um observador na Terra. O ângulo de elevação é maior no verão e faz com que o Sol percorra um caminho mais próximo ao alto do céu, o que resulta em dias mais longos nesta estação. O Sol percorre uma trajetória mais próxima ao horizonte no inverno, o que torna os dias mais curtos (figura 2.4).

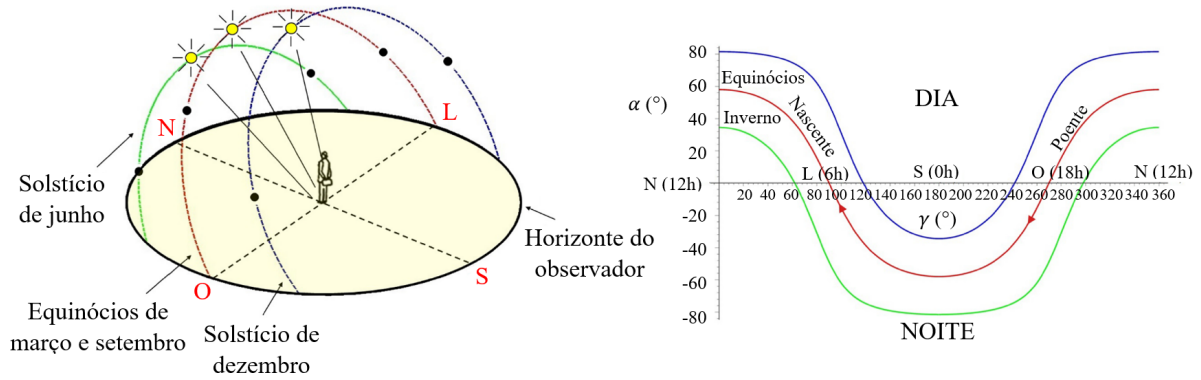


Figura 2.4: Variação da trajetória do Sol no céu visto por um observador em -32° S.
Fonte: Costa e Maroja (2018).

As equações da declinação solar, do ângulo de incidência e do azimute foram extraídas do livro de Duffie e Beckman (2013). A equação 2.1 expressa a declinação solar com um erro inferior a $0,035^\circ$, e B é uma função do dia do ano ($1 < n < 365$), dada pela equação 2.2.

$$\begin{aligned} \delta_n = & 0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \sin B - 0,006758 \cos 2B \\ & + 0,000907 \sin 2B - 0,002679 \cos 3B + 0,00148 \sin 3B \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (2.2)$$

O ângulo zenital para uma superfície horizontal depende da latitude, da declinação e do ângulo solar e é calculado pela equação 2.3.

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (2.3)$$

O azimute (equação 2.4) varia de -180° a 180° , e o seu sinal é o mesmo do ângulo horário, negativo antes do meio-dia e positivo após o meio-dia.

$$\gamma_s = \text{sinal}(\omega) \left| \arccos \frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \right| \quad (2.4)$$

2.2 Concentradores de Scheffler

O concentrador de Scheffler está entre as tecnologias de concentração solar capazes de oferecer uma área focal em uma região fixa (REDDY; KHAN, 2019). Ele se enquadra na categoria de refletores de formação de imagem que coletam e concentram a radiação solar em um receptor para a conversão em calor (MELLALOU et al., 2019). Foi desenvolvido pelo físico austríaco Wolfgang Scheffler com o propósito de obter um foco de qualidade a partir de estruturas simples e um sistema de rastreamento reduzido para que possa ser construído, mantido e operado sem grandes complicações, com baixo custo e em nações em desenvolvimento (IODICE et al., 2021).

Os raios solares que atingem a superfície refletora se concentram em um ponto focal situado fora da projeção da moldura do refletor, o que evita a formação de sombra no concentrador (DIB; FIORELLI, 2015). Embora o concentrador precise estar posicionado sob o Sol, as suas características permitem que a imagem seja formada na sombra. Assim, o receptor pode ser instalado à sombra ou no interior de um edifício.

O concentrador de Scheffler é balanceado para que o rastreamento do Sol necessite de apenas um único torque para ser efetuado. Esse mecanismo pode ser operado por um sistema eletromecânico ou um relógio mecânico que atua por meio da gravidade (MUNIR; HENSEL; SCHEFFLER, 2010). Além disso, o foco se concentra ao nível do solo, o que facilita a sua manutenção (REDDY; KHAN, 2019). Nas próximas subseções são apresentados as características geométricas do refletor, os princípios de funcionamento do concentrador, como o seu formato é adaptado para os diferentes ângulos da luz solar e exemplos de aplicação.

2.2.1 Aspectos geométricos e operacionais de concentradores de Scheffler

A estrutura do refletor de Scheffler é definida pela intersecção de um plano inclinado e um parabolóide elíptico, a qual origina uma moldura elíptica como mostrada na figura 2.5 (MELLALOU et al., 2019). A projeção da moldura elíptica no plano horizontal é um círculo representado na figura 2.6 e corresponde à “Área de abertura” do concentrador, cujo raio é igual ao semieixo menor da elipse (MUNIR; HENSEL; SCHEFFLER, 2010). A letra α corresponde à inclinação do semieixo maior. Os raios solares que atingem a superfície refletora são perpendiculares ao eixo polar da Terra no equinócio, quando α vale $43,23^\circ$ e a tangente no ponto P (pivô central) vale 45° (DIB, 2021).

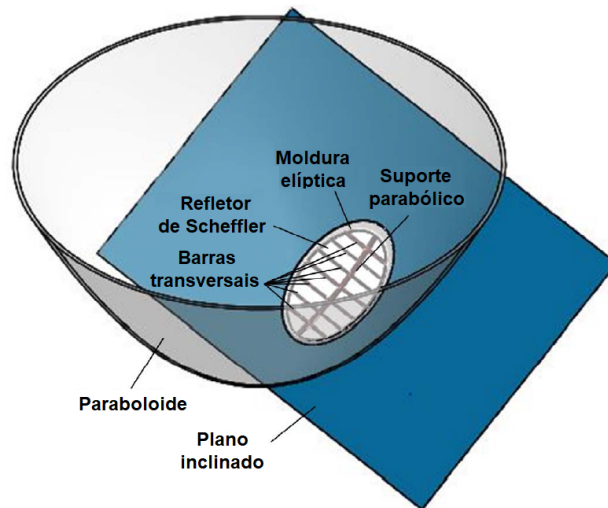


Figura 2.5: Modelo sólido de um refletor de Scheffler.
Fonte: Adaptado de Reddy et al. (2018).

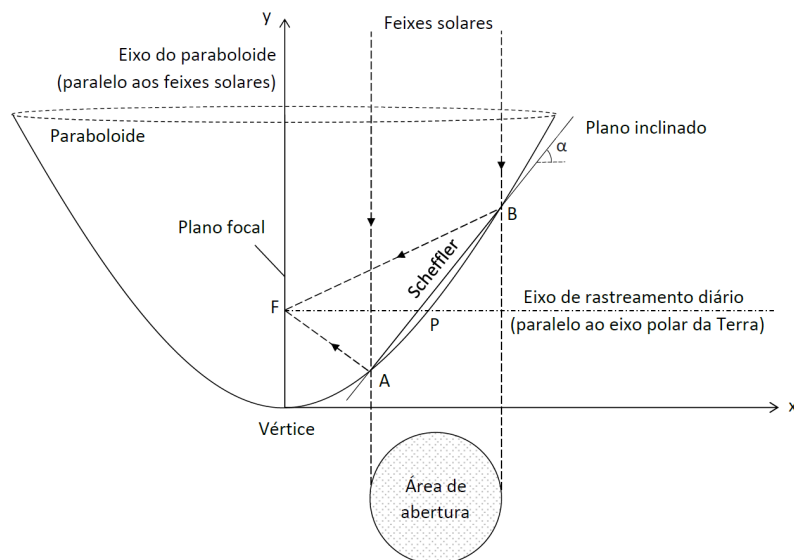


Figura 2.6: Concentrador de Scheffler na posição do Equinócio.
Fonte: Elaborada pela Autora.

A superfície refletora acompanha o movimento do Sol ao longo do dia por meio de uma rotação em torno do eixo de rastreamento diário, o qual possui a mesma direção e é paralelo ao eixo polar da Terra. Este eixo passa pelo foco do parabolóide (ponto F) e próximo ao centro do suporte do refletor, e a sua inclinação deve ser a mesma da latitude local (REDDY et al., 2018). A figura 2.7 mostra um forno solar localizado na linha do Equador, em que o eixo de rastreamento diário está representado por uma reta horizontal que aponta para o Norte e é paralela ao eixo polar da Terra. As inclinações da superfície refletora estão sobrepostas e representam as suas posições quando os feixes solares incidem em ambos os solstícios. Uma vez que o Sol é visto próximo à linha do horizonte no inverno e próximo ao alto do céu no verão, o ângulo incidente da luz solar na

superfície terrestre varia a cada dia (SCHEFFLER, 2006). O refletor é projetado para alterar a sua inclinação e o formato de sua superfície para se adaptar aos diferentes ângulos da luz solar e manter o foco fixo. Este mecanismo garante que o foco e o concentrador permaneçam no mesmo local (OELHER; SCHEFFLER, 1994).

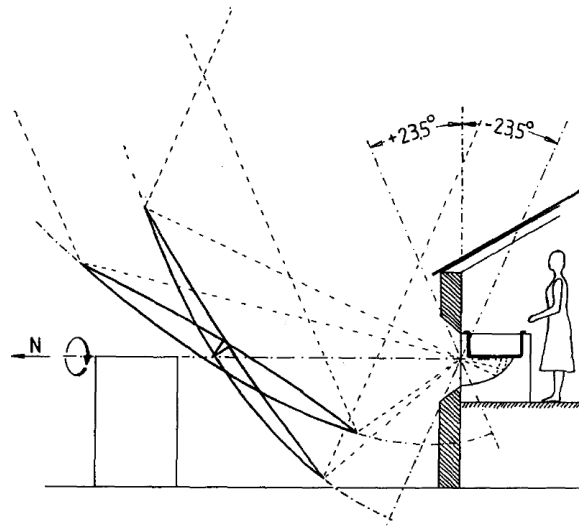


Figura 2.7: Esquema de operação de um concentrador de Scheffler na linha do Equador posicionado ao norte do foco.
Fonte: Oelher e Scheffler (1994).

Em concentradores de Scheffler, o eixo do paraboloide deve estar sempre paralelo aos feixes de luz. A figura 2.8 representa a disposição do concentrador quando o referencial é o eixo de rastreamento diário e quando é o Sol. A figura 2.8(a) corresponde à visão de um observador na Terra, em que o eixo de rastreamento diário e o plano focal permanecem estacionários. O ponto P sempre se mantém fixo em relação ao solo e se localiza próximo ao centro do refletor. Este ponto coincide com o eixo de rastreamento sazonal perpendicular ao plano da figura. A distância entre os pontos P e F é sempre constante (DIB; FIORELLI, 2015).

Para garantir o paralelismo entre o eixo do paraboloide e os feixes de luz, o eixo do paraboloide deve acompanhar o movimento do Sol com o giro de um ângulo equivalente ao da declinação solar ao redor do foco. O ajuste é feito por meio da inclinação do maior eixo da borda elíptica com um ângulo igual à metade da declinação solar em torno de P (REDDY et al., 2018).

A figura 2.8(b) mostra o cenário em que o Sol é o referencial. Observa-se que a parábola é mais fechada no verão e mais aberta no inverno. Dado que o Sol permanece estático, o eixo de rastreamento diário e o plano focal (perpendiculares entre si) sofrem uma rotação em um ângulo equivalente à declinação solar (REDDY et al., 2018).

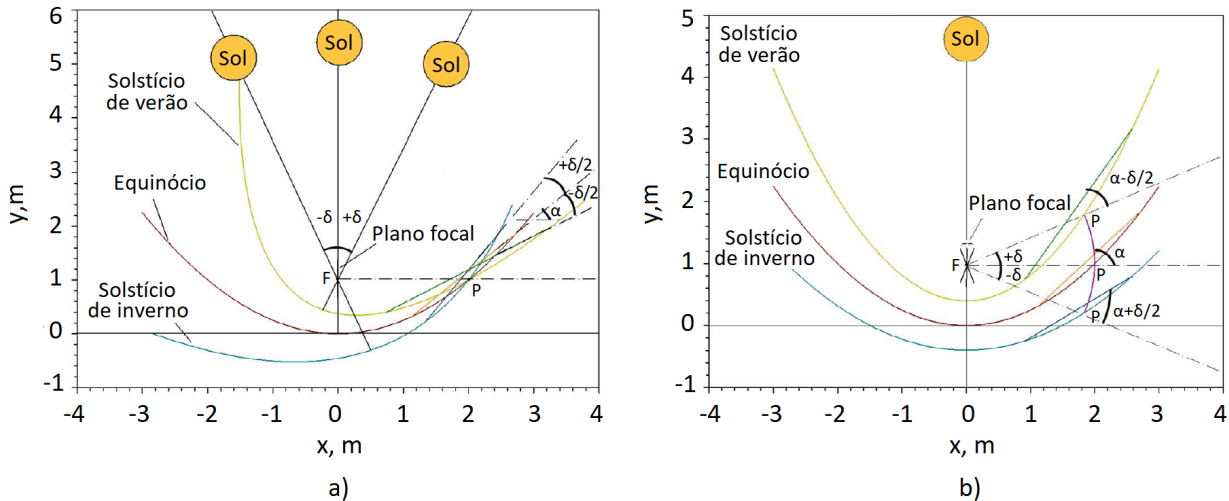


Figura 2.8: Orientações de um refletor de Scheffler conforme as variações sazonais em relação (a) ao eixo de rastreamento diário e (b) ao Sol.

Fonte: Adaptado de Reddy et al. (2018).

Em Dib (2021) foi feita a modelagem do concentrador de Scheffler utilizado neste trabalho com base no modelo proposto em Munir, Hensel e Scheffler (2010). As seguintes equações apresentadas foram extraídas do trabalho de Dib (2021) e utilizadas nas simulações para determinar os valores teóricos da geometria do concentrador e da imagem formada por ele.

A orientação do eixo de rastreamento diário possibilita que o concentrador esteja voltado somente para as direções norte ou sul. A nomenclatura utilizada neste trabalho foi escolhida de acordo com a posição do refletor em relação ao foco para o qual se direciona. Um Scheffler Sul (SS) está ao sul do foco, e um Scheffler Norte (SN) ao norte do foco. A inclinação da parábola para um dado dia do ano é definida pela equação 2.5 conforme a declinação solar e a latitude local. O sinal positivo se refere a um SS e o negativo a um SN, independente do hemisfério em que se localizem (figura 2.9) (DIB, 2021).

$$\alpha_n = 43,23^\circ \pm \frac{\delta_n}{2} - \phi \quad (2.5)$$

O sistema de rastreamento diário gira em sentido oposto à rotação da Terra e com uma velocidade de 15° por hora. É necessário um certo grau de acurácia para não reduzir o desempenho do concentrador. O movimento pode ser feito com um relógio mecânico mediante um arranjo de engrenagens ou por eletricidade com um conjunto de polias e cabos acoplado a um motor. Costuma ser necessário, em ambos os casos, um operador para alinhar o refletor com o Sol por meio de um mecanismo manual uma vez pela manhã nos dias de utilização, embora o sistema seja capaz de

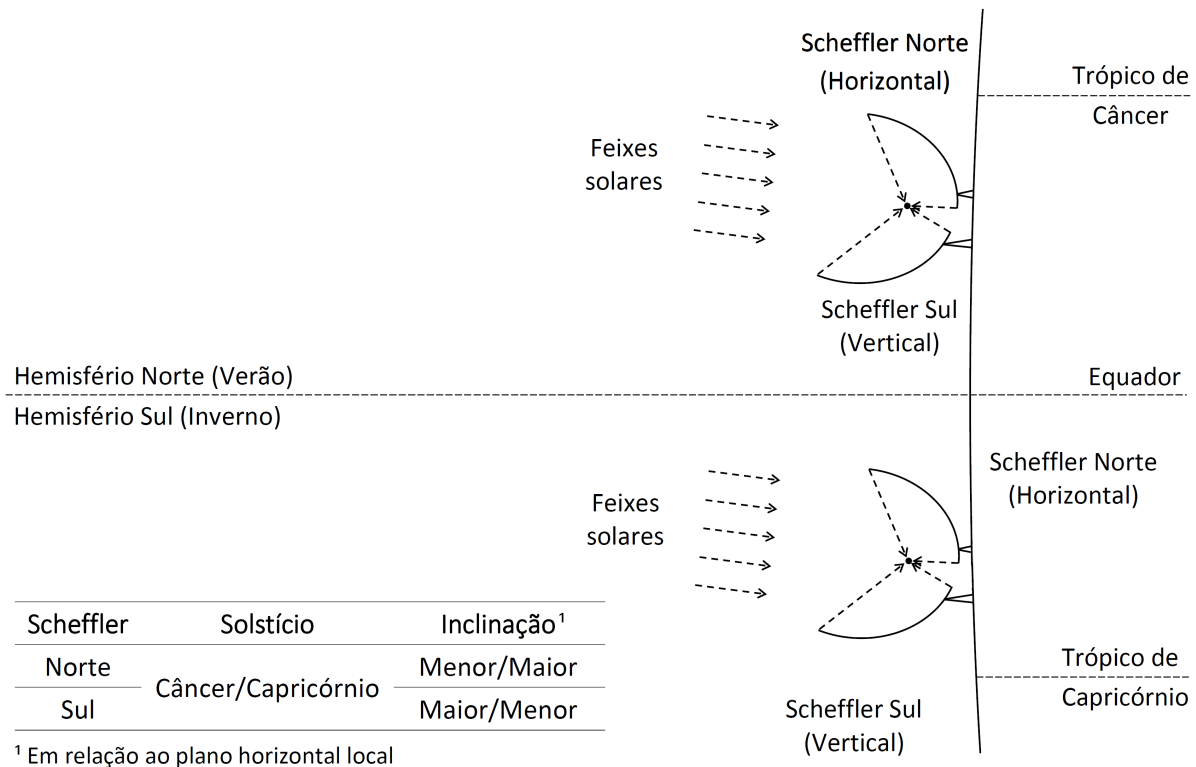


Figura 2.9: Representação do SS e SN em ambos os hemisférios durante o solstício de Câncer.
Fonte: Elaborada pela Autora.

manter o rastreamento ao longo do dia (INDORA; KANDPAL, 2018).

Os concentradores de Scheffler foram desenvolvidos para que a manutenção seja simples. Toda a estrutura pode ser moldada para alterar o perfil da parábola, o que elimina a necessidade de mecanismos complexos para o rastreamento sazonal, de modo que um único rastreamento diário é necessário (REDDY et al., 2018).

O ajuste da superfície refletora é realizado por duas pinças telescópicas localizadas nas extremidades do refletor, por meio das quais se corrige a inclinação na metade da variação da declinação solar. A superfície é deformada com um ajuste manual até a luz se concentrar em um foco pequeno e fixo. As duas pinças telescópicas são unidas no maior eixo da moldura elíptica como mostrado na figura 2.10. Os feixes solares deixam de convergir em um foco quando o Sol muda de posição no decorrer dos dias e são concentrados novamente com o ajuste adequado da inclinação e curvatura da parábola (MUNIR; HENSEL; SCHEFFLER, 2010).

A extensão ou encurtamento das pinças permite alongar ou contrair o eixo maior da borda elíptica enquanto provoca respectivamente a contração ou alongamento do eixo menor. Esse ajuste gera uma moldura elíptica com uma maior excentricidade no verão do que no inverno como mostra a simulação de Reddy e Khan (2019) na figura 2.11. A área da elipse é calculada pela equação 2.6

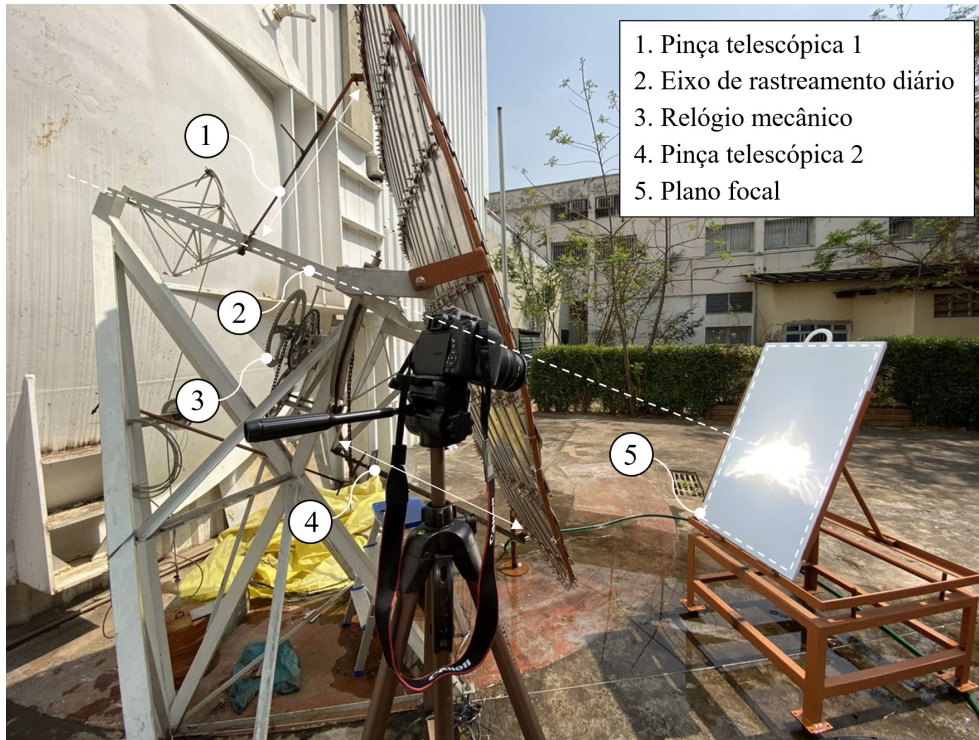


Figura 2.10: Mecanismos dos ajustes diário e sazonal do concentrador de Scheffler estudado.

conforme o dia do ano, em que $a_{s,n}$ é o semieixo menor da moldura elíptica (equação 2.7) e $b_{s,n}$ o semieixo maior (equação 2.8) (DIB, 2021).

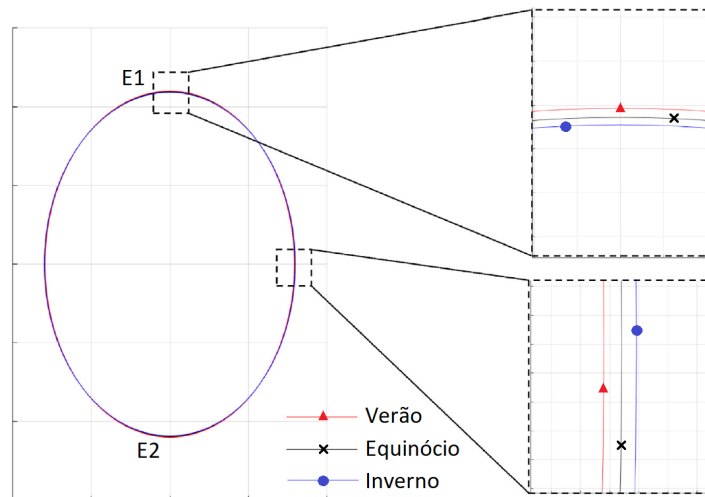


Figura 2.11: Variação sazonal da moldura elíptica de um concentrador de Scheffler.
Fonte: Adaptado de Reddy e Khan (2019).

$$A_{s,n} = \pi \times a_{s,n} \times b_{s,n} \quad (2.6)$$

$$a_{s,n} = \sqrt{\frac{A_{ap,n}}{\pi}} \quad (2.7)$$

$$b_{s,n} = \frac{a_{s,n}}{\cos(\alpha_n)} \quad (2.8)$$

Quando o maior eixo da moldura elíptica é alongado, o plano inclinado se aproxima do pivô central e a curvatura da parábola se fecha. O alongamento do maior eixo e a conseqüente contração do menor eixo reduzem a área de abertura, devido ao raio ser equivalente ao semieixo menor da moldura. De modo semelhante, a contração do maior eixo e o conseqüente alongamento do menor eixo resultam no aumento da área de abertura (REDDY; KHAN, 2019). Os efeitos desse ajuste foram ilustrados na figura 2.12. A área de abertura em função de n é dada pela equação 2.9 (DIB, 2021).

$$A_{ap,n} = A_{s,n} \times \cos(\alpha_n) \quad (2.9)$$

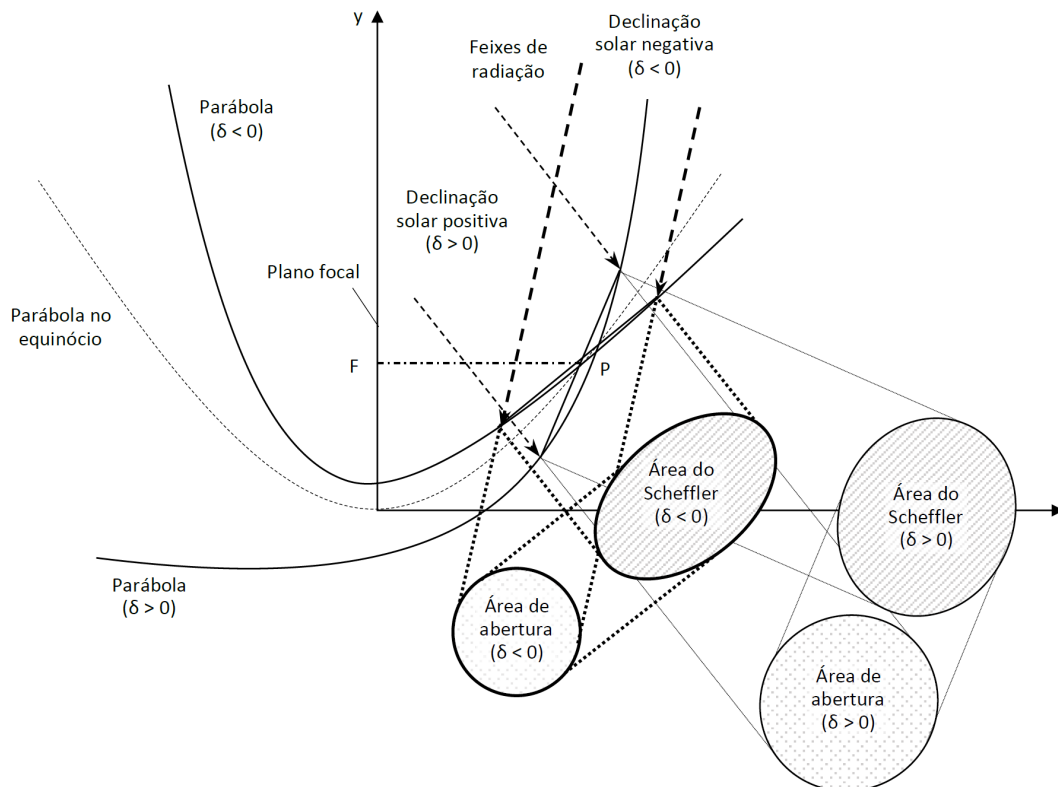


Figura 2.12: Ajuste sazonal da área da moldura elíptica e da área de abertura de um concentrador de Scheffler.

Fonte: Elaborada pela Autora.

Em Dib (2021) foi feita uma simulação da área de abertura de um SS e SN de 1 m² no

equinócio em função da declinação solar. A figura 2.13 mostra que a área de abertura de cada concentrador varia de maneira inversa. O pico da curva de um SS ocorre no solstício de Câncer, e o vale no solstício de Capricórnio. O oposto é observado em um SN. Um SS possui uma capacidade maior de oferecer energia no inverno do que no verão no hemisfério sul por apresentar uma maior área de abertura no solstício de Câncer. A variação real da área de abertura de um concentrador depende da flexibilidade da estrutura do refletor, a qual pode divergir conforme o projeto e o processo construtivo.

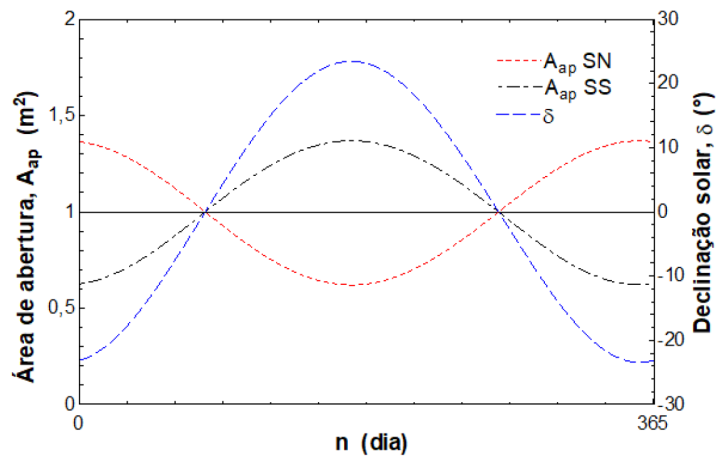


Figura 2.13: Variação da área de abertura de um Scheffler conforme a declinação solar.
Fonte: Dib (2021).

A declinação solar segue um movimento cíclico com o maior gradiente nos equinócios e um gradiente igual a zero nos solstícios como mostrado na figura 2.13. Devido ao seu comportamento cíclico, as declinações de um mesmo intervalo antes e depois dos solstícios são iguais. O mesmo efeito não é observado nos equinócios. O estudo feito por Alberti (2014) buscou avaliar o movimento do foco quando se deixa de ajustar um refletor perfeito conforme a sazonalidade. Identificou-se que o foco se manteve nas imediações do ponto focal ao ajustá-lo a cada duas ou três semanas quando próximo dos solstícios. Este intervalo pode ser adiado em até o dobro do tempo devido ao comportamento da curva da declinação solar, visto que o foco tende a se deslocar do ponto original quando é ajustado antes do solstício e a retornar para a posição inicial após o solstício. Concentradores reais apresentam distorções do foco ocasionadas pelo processo de fabricação, deformação e desgaste. Tendo isso em vista, foi proposto que os ajustes sazonais sejam realizados pelo menos uma vez por semana quando próximo aos equinócios e a cada duas semanas quando próximo aos solstícios.

Os parâmetros da parábola foram definidos em relação ao seu posicionamento no equinócio ($\delta = 0$). A figura 2.14 mostra um SS e SN em um mesmo foco representados pelas linhas sólidas sobre

o perfil parabólico tracejado. Os ângulos de vértice correspondem aos ângulos formados entre o eixo da parábola com o segmento de reta que conecta o foco aos pontos extremos do refletor (A e B) e ao ponto P , os quais estão representados por ϕ_a , ϕ_b e ϕ_{eixo} , respectivamente (DIB, 2021).

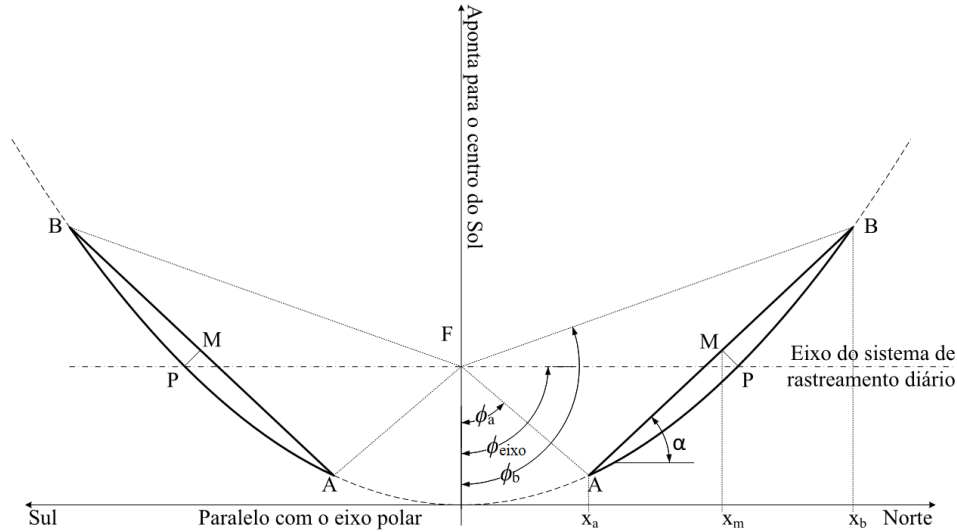


Figura 2.14: Vista no plano xy de um SS (4° quadrante) e SN (1° quadrante) em um mesmo foco no equinócio.
Fonte: Dib (2021).

A reta que passa sobre o semieixo maior (\overline{AB}) foi descrita pela equação 2.10, em que $m_{ab,n} = \tan(\alpha_n)$. Perpendicular a ela, tem-se a reta que passa sobre os pontos M e P conforme a equação 2.11, em que $m_{mp,n} = \tan(\alpha_n - 90^\circ)$. O pivô está ao centro do comprimento entre os pontos A e B localizados sobre a parábola definida no plano de corte xy , a qual foi representada pela equação 2.12. O termo $C_{p,n}$ é nulo e dy/dx é igual a $\tan(45^\circ)$ apenas no equinócio. Deste modo, $x_{p,n} = 2f$ e $y_{p,n} = f$, sendo f a distância focal do paraboloide. As coordenadas em x dos pontos A e B são determinadas pelas equações 2.13 e 2.14, a partir das quais se pode reescrever a equação do semieixo menor com a equação 2.15 (DIB, 2021).

$$y = m_{ab,n}x + C_{ab,n} \quad (2.10)$$

$$y = m_{mp,n}x + C_{mp,n} \quad (2.11)$$

$$y = m_{p,n}x^2 + C_{p,n} \quad (2.12)$$

$$x_a = \frac{m_{ab}}{2m_p} - \left[\left(\frac{m_{ab}}{2m_p} \right)^2 - \frac{C_p - C_{ab}}{m_p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

$$x_b = \frac{m_{ab}}{2m_p} + \left[\left(\frac{m_{ab}}{2m_p} \right)^2 - \frac{C_p - C_{ab}}{m_p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

$$a_{s,n} = \frac{x_b - x_a}{2} = \left[\left(\frac{m_{ab}}{2m_p} \right)^2 - \frac{C_p - C_{ab}}{m_p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

As alterações no formato da superfície refletora provocam variações no tamanho da imagem conforme apresentado no capítulo 4. Utilizou-se o modelo matemático proposto por Dib (2021), baseado nas características ópticas e de geometria analítica, associado aos resultados experimentais adquiridos em diferentes condições de declinação solar para caracterizar o comportamento da imagem no período de um ano. O objetivo do estudo foi auxiliar os projetos de receptores, uma vez que o dimensionamento incorreto da região focal é capaz de elevar as perdas térmicas (DIB; FIORELLI, 2015).

2.2.2 Aplicações de concentradores de Scheffler

Nesta subseção é apresentado um conjunto de trabalhos e aplicações práticas que utilizaram os concentradores de Scheffler. O objetivo é mostrar a sua versatilidade e o seu vasto campo de aplicação por meio das avaliações e resultados de desempenho obtidos por outros pesquisadores. Os concentradores foram estudados em aplicações e disposições distintas, por exemplo, quando mais de um refletor é utilizado em um mesmo receptor.

O concentrador de Scheffler se tornou popular por ser capaz de gerar um foco de qualidade elevada e estável o suficiente e de ser construído, operado e mantido por uma mão de obra local, sem a necessidade de assistência técnica (BAJAJ; RAJ; SRINIVAS, 2016). É adequado para aplicações de média e alta temperaturas. O refletor rastreia o movimento do Sol e concentra os raios solares em um foco fixo que aquece um receptor, onde o calor é transferido para um fluido de trabalho que pode ser utilizado em diversas finalidades (KUMAR; PRAKASH; KAVITI, 2017).

A princípio, os concentradores de Scheffler foram estudados em aplicações voltadas para o cozimento, esterilização e destilação. Contudo, as análises experimentais mostraram que é possível ampliar o seu campo de aplicação para sistemas de energia solar térmica por meio da produção de

vapor saturado e expansão em turbinas ou expansores volumétricos. As plantas solares atuais de baixa e média temperatura são em geral baseadas em um ciclo de Rankine combinado com fluidos orgânicos. Essa solução utiliza a troca de calor entre dois fluidos, o que pode gerar perdas de energia térmica útil, além de apresentar queda no desempenho em altas temperaturas devido à instabilidade térmica, toxicidade e inflamabilidade dos fluidos orgânicos. Por essas razões, houve um estímulo para o desenvolvimento de sistemas de energia solar concentrada com geração direta de vapor (IODICE et al., 2021). A tabela 1 apresenta alguns dos trabalhos que consideraram os concentradores de Scheffler para produção de calor tanto na indústria quanto para o uso doméstico.

Tabela 1: Aplicações de concentradores de Scheffler.

Autor	Aplicação	A_{ap} (Equinócio)	Quantidade de concentradores
Iodice et al. (2021)	Geração de eletricidade (ciclo Rankine)	27,6 m ²	1
Balasubramanian, Srinivas e Raman (2015)	Geração de eletricidade (ciclo Brayton)	11 m ²	1
Tyroller (2006)	Esterilização de equipamentos médicos	10 m ²	1
Chandak e Somani (2011)	Forno industrial	16 m ²	1 e 2
Afzal et al. (2017)	Extração de óleos essenciais	10 m ²	1
Acharya e Chandak (2013)	Produção de gesso	16 m ²	1
Indora e Kandpal (2018)	Cozinha solar	10 m ²	2
Agrawal e Yadav (2020)	Aquecimento de gelo (uso doméstico)	1 m ²	1
Watal et al. (2013)	Cozinha solar (Bosch Ltd.)	16 m ²	18
India-One (2017)	Usina solar térmica (ciclo Rankine)	60 m ²	770

3 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO FOCAL E DO FLUXO DE ENERGIA DE CONCENTRADORES

Estudos que visam melhorar o desempenho óptico dos sistemas de concentração solar estão bastante presentes na literatura. Para estimá-la, é preciso conhecer previamente a distribuição do fluxo focal (CHERIF et al., 2019). A caracterização anual do fluxo de energia e da geometria da imagem do concentrador de Scheffler deste trabalho utilizou a metodologia e o modelo teórico de Dib (2021), cuja validação foi feita a partir dos resultados de quatro experimentações. Este trabalho visa estender essa validação para um ano inteiro, com o objetivo de avaliar experimentalmente o efeito da sazonalidade.

Em relação a esse aspecto, há poucas investigações experimentais e teóricas a respeito do efeito da sazonalidade sobre as imagens formadas por concentradores de Scheffler. O presente trabalho busca ampliar a base de dados experimentais no que diz respeito à distribuição de energia na região focal e contribuir para o entendimento do fluxo focal ao longo do ano, que pode ser utilizado no desenvolvimento de soluções em projetos futuros de coletores mais eficientes e seguros. Assim, este capítulo abrange uma revisão de trabalhos de diferentes tecnologias de concentração solar, cujas distribuições do fluxo de energia não são uniformes, como ocorre nos concentradores de Scheffler, de forma a aprofundar o conhecimento do fluxo da energia na zona focal.

Uma das etapas de projeto de um coletor é a definição da área de abertura de captação dos feixes de energia solar concentrada. Pode-se dimensioná-la por meio da fração de interceptação, definida como a parcela do total da energia solar concentrada que incide no receptor. Em Xia, Dai e Shuai (2012), a distribuição do fluxo da energia solar de um concentrador de dezesseis pratos de 1 m de diâmetro foi medida com uma câmera de infravermelho e um alvo lambertiano resfriado a água e analisada pelo método de *ray tracing* de Monte Carlo. Os resultados experimentais e teóricos foram comparados em relação ao ângulo de desvio decorrente da superfície espelhada e processo construtivo.

A distribuição do fluxo se assemelhou a uma distribuição gaussiana, e a curva que melhor se adaptou foi a de 2,2 mrad (figura 3.1a). O erro de rastreamento influencia na distribuição

da imagem produzida pelo sol na abertura do receptor. A figura 3.1(b) mostra que a fração de interceptação teve um aumento acentuado quando o raio foi inferior a 0,06 m e se aproximou a um platô de maneira progressiva a partir dessa abertura. Verificou-se que a fração de interceptação para um raio de abertura de 6 cm foi de 80%.

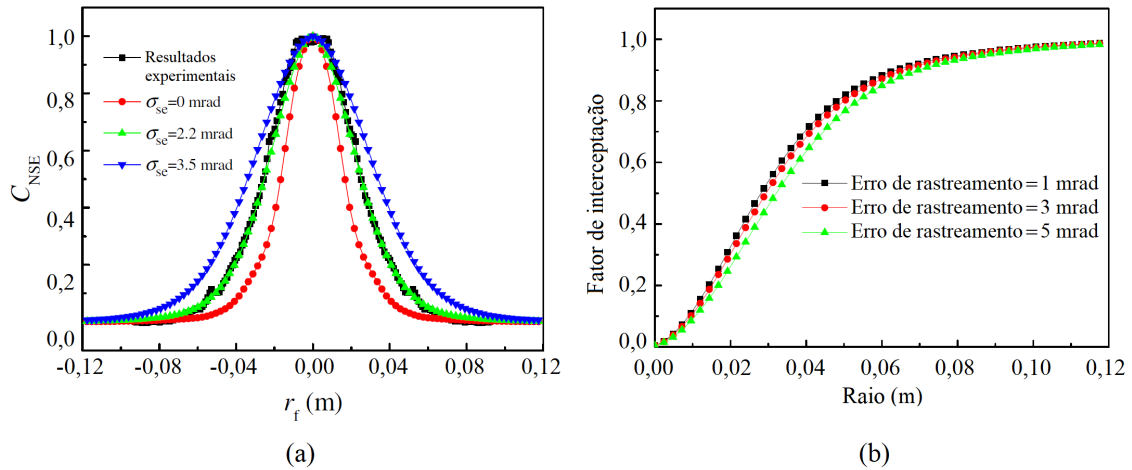


Figura 3.1: (a) Resultados numéricos e experimentais da razão de concentração no plano focal. (b) Fator de interceptação em função do raio de abertura do receptor para diferentes erros de rastreamento.

Fonte: Adaptado de Xia, Dai e Shuai (2012).

Abuseada e Ozalp (2020) estudaram os efeitos da variação da área de abertura de um receptor de cavidade cilíndrica, que ocorrem na temperatura média e máxima atingida em seu interior e nos diferentes modos de transferência de calor conforme o aumento da temperatura do receptor. Os receptores de cavidade possuem uma área de abertura que visa maximizar a captação da irradiação solar e minimizar a rerradiação perdida de dentro da cavidade. O tamanho de abertura ideal é o resultado do equilíbrio desses dois fenômenos quando se busca uma temperatura ou uma eficiência maximizada. Muitos fatores interferem neste equilíbrio. Contudo, os mais importantes são a temperatura da cavidade e a distribuição da energia da fonte solar. Ambos podem ser regulados por um mecanismo de abertura variável, o qual foi desenvolvido pelos autores com uma variação de diâmetro de 2 cm a 8,75 cm.

A maioria das aplicações de refletores parabólicos ou elipsoidais utiliza receptores com abertura circular por ser compatível com a natureza da distribuição do fluxo de calor dessas tecnologias. A análise óptica foi desenvolvida pelo método de *ray tracing* de Monte Carlo e validada pelos resultados experimentais. Os experimentos foram feitos com um simulador de alto fluxo composto por lâmpadas de xenônio de 10 kWe, cuja saída de energia foi controlada pelo ajuste da corrente entre 120 A e 200 A.

A distribuição do fluxo de calor no plano focal obtida se assemelhou a uma distribuição lorentziana como observada na figura 3.2. A partir da caracterização do fluxo de energia no plano de abertura, simulou-se as curvas de temperatura em seu interior em relação à variação da área de abertura. Um receptor com abertura variável é vantajoso em aplicações que requerem condições quase constantes, estáveis com pequenas variações, para maximizar a eficiência de processos. De modo geral, esse estudo indicou que a abertura ideal diminuiu à medida que a potência total da fonte aumentou ao considerar as temperaturas máxima e média. Com um DNI variável, este tipo de receptor pode ser continuamente otimizado com modelos preditivos que variam a abertura na busca de obter uma máxima eficiência do processo ao maximizar ou manter a temperatura em um valor quase constante.

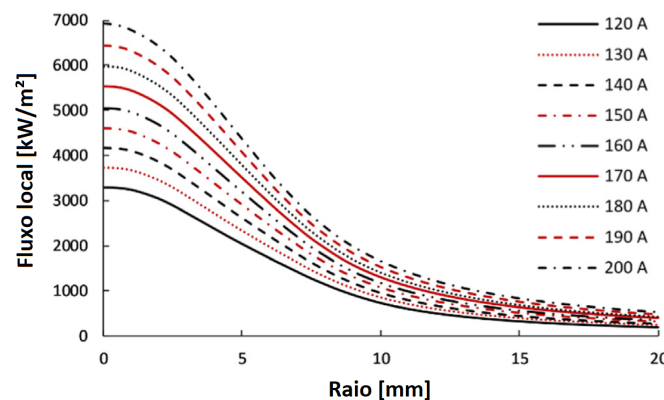


Figura 3.2: Distribuição bidimensional do fluxo de calor simétrico em $r = 0$ mm.
Fonte: Adaptado de Abuseada e Ozalp (2020).

Xiao et al. (2020) simularam o foco de um concentrador de prato parabólico pelo método de *ray tracing* de Monte Carlo no Fluent 16.0. O objetivo foi avaliar a influência do erro de rastreamento na eficiência óptica do coletor, definida como a relação entre a energia absorvida pelo receptor e a energia total recebida pelo concentrador. O foco apresentou geometria circular e simétrica distribuída no centro do plano focal quando o erro de rastreamento foi igual a zero. O foco se moveu de modo gradual na direção negativa do eixo y conforme o erro de rastreamento (δ_{tr}) aumentou e somente se desviou por completo da origem quando o erro atingiu 6 mrad (figura 3.3).

A variação do erro de rastreamento de 0 a 6 mrad reduziu a eficiência em menos de 0,2%. A influência do erro de rastreamento está relacionada à dimensão geométrica de todo o sistema de concentração solar. A razão de concentração do concentrador estudado foi de 270 e é considerada pequena, o que indicou que a abertura do receptor foi grande o suficiente para interceptar a

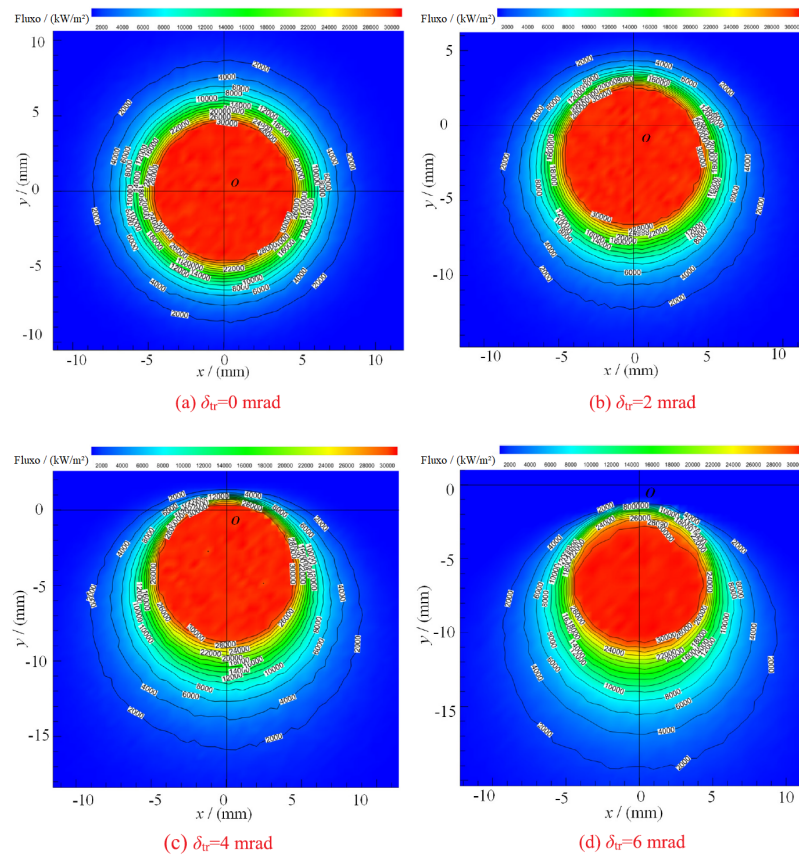


Figura 3.3: Distribuição do fluxo no plano focal para os diferentes erros de rastreamento e $DNI = 1000 \text{ W/m}^2$.

Fonte: Adaptado de Xiao et al. (2020).

maioria dos raios à medida que o erro de rastreamento aumentou. Em alguns concentradores com elevada taxa de concentração geométrica, os raios podem sofrer uma maior influência do erro de rastreamento e um maior desvio na abertura do receptor.

Um modelo realista da distribuição do fluxo de radiação é o fator mais importante para verificar o desempenho de um coletor solar. Em Qiu et al. (2015), um modelo baseado no método de *ray tracing* de Monte Carlo foi desenvolvido para caracterizar o fluxo de calor incidente no plano focal e, em seguida, validado por experimentações. Foram utilizadas lâmpadas de arco de xenônio de 7 kW, um alvo lambertiano, um radiômetro e uma câmera com um sensor CCD. A distribuição do fluxo foi mapeada como mostrada na figura 3.4(a). As intensidades médias calculadas nas áreas A1 e A2 da figura 3.4(b) foram de $120,63 \text{ kW/m}^2$ e $77,62 \text{ kW/m}^2$, respectivamente, e a radiação concentrada em A1 foi de 1,85 kW, o que equivale a um valor próximo de 70% da energia total incidente. Esta área foi delimitada para ser a abertura de vidro do receptor.

Fatores como DNI, a geometria dos componentes do coletor e o sombreamento no dispositivo

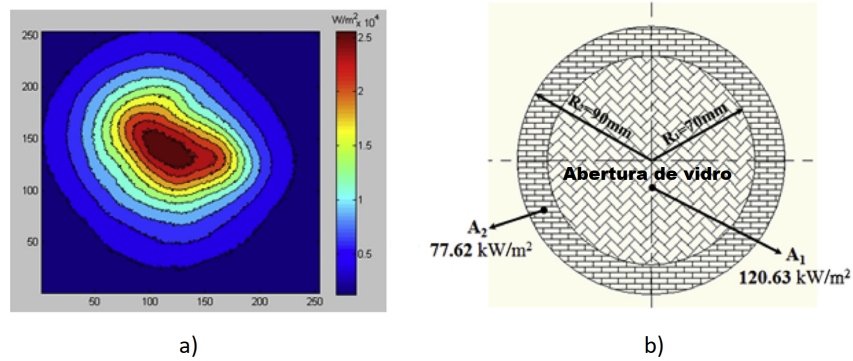


Figura 3.4: a) Fluxo de radiação no plano focal. b) Áreas delimitadas no plano focal.
Fonte: Adaptado de Qiu et al. (2015).

interferem na quantidade de radiação solar interceptada na abertura do receptor. Busca-se reduzir ao máximo as perdas de energia associadas a este tipo de sistema para obter uma máxima captação da energia solar incidente (XIAO et al., 2020). O fluxo solar não uniforme é capaz de gerar elevados gradientes de temperatura que podem comprometer a segurança devido ao elevado estresse e deformação térmica, além de haver a possibilidade de ocorrência de desnaturação térmica do fluido de transferência de calor. Esse cenário se intensifica em sistemas de prato solar em decorrência de uma maior taxa de concentração e temperatura de operação (HE et al., 2019).

A caracterização óptica de sistemas de concentração solar é importante para determinar as características físicas de receptores (CISNEROS-CÁRDENAS et al., 2020). Em geral, há a necessidade de otimizar os coletores solares de modo que a distribuição do fluxo solar seja compatível com a capacidade de transferência de calor do fluido de trabalho e assim obter uma solução eficaz e segura. As soluções podem ser classificadas como passivas e ativas. As soluções passivas consistem em adequar a capacidade de transferência de calor do fluido de trabalho em relação à distribuição do fluxo no receptor. As soluções ativas estão voltadas para homogeneizar a distribuição do fluxo de energia de acordo com a capacidade de transferência de calor do fluido de trabalho (HE et al., 2019).

Os trabalhos de He et al. (2017) e de Alberti (2014), apresentados a seguir, caracterizaram o fluxo e avaliaram o efeito da aplicação de técnicas semelhantes às de soluções ativas. Em He et al. (2017) foram estudadas duas estratégias de concentração da energia de um sistema de torre central, cujo fluxo solar apresenta uma distribuição não uniforme. Uma delas é a tradicional de um ponto, na qual todos os helióstatos direcionam os feixes para o centro da abertura do receptor. A outra foi chamada de estratégia de multiponto, em que há mais de um ponto de concentração. Neste último

caso, os heliostatos são divididos em grupos responsáveis por concentrar os feixes em um ponto correspondente.

A estratégia de multiponto tem por objetivo desfocar a região do foco, o que pode contribuir com a homogeneização do fluxo, redução da média de temperatura e elevação da eficiência térmica do sistema. A figura 3.5 mostra a distribuição de energia na superfície de um receptor de cavidade de um sistema de torre central. O fluxo na área de abertura é mais uniforme se adotada a estratégia de multiponto, a qual foi capaz de reduzir o pico de energia na superfície dos tubos de 514 kW/m^2 para 460 kW/m^2 com apenas uma redução de 1% das perdas ópticas da potência absorvida.

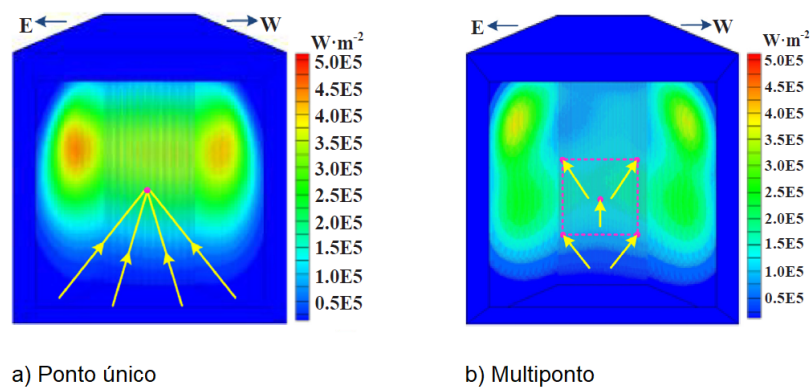


Figura 3.5: Fluxo solar na superfície dos tubos de um absorvedor de cavidade.
Fonte: Adaptado de He et al. (2017) (apud He et al. (2019)).

É possível obter um efeito semelhante ao da dispersão do foco em concentradores de Scheffler pela aproximação ou afastamento do receptor do plano focal teórico e assim obter uma distribuição de energia mais uniforme. Alberti (2014) simulou a dinâmica provocada pelos efeitos de deformações do refletor que desviam as trajetórias dos feixes. As análises consideraram deformações uniformes de um refletor perfeito, as quais convergem os feixes para uma distância focal maior ou menor da distância teórica. Deve-se levar em consideração que as deformações presentes em um refletor real não necessariamente convergirão todos os feixes para um único ponto, pois dispersões e distorções irregulares do foco podem ocorrer conforme o refletor é flexionado e devidas às características de sua superfície.

A análise forneceu a distribuição da energia na zona focal quando se projeta o foco antes ou depois do plano teórico. A região do foco é caracterizada pela zona de maior concentração dos feixes na figura 3.6. A desfocagem pode ser utilizada em projetos de receptores quando se tem por objetivo reduzir os elevados gradientes de temperatura na superfície absorvedora. Tanto o afastamento quanto a aproximação do plano focal produzem um aumento da área da imagem

projetada no plano yz . Quanto maior for a distância entre o plano focal real e teórico, maior é a área projetada na superfície absorvedora.

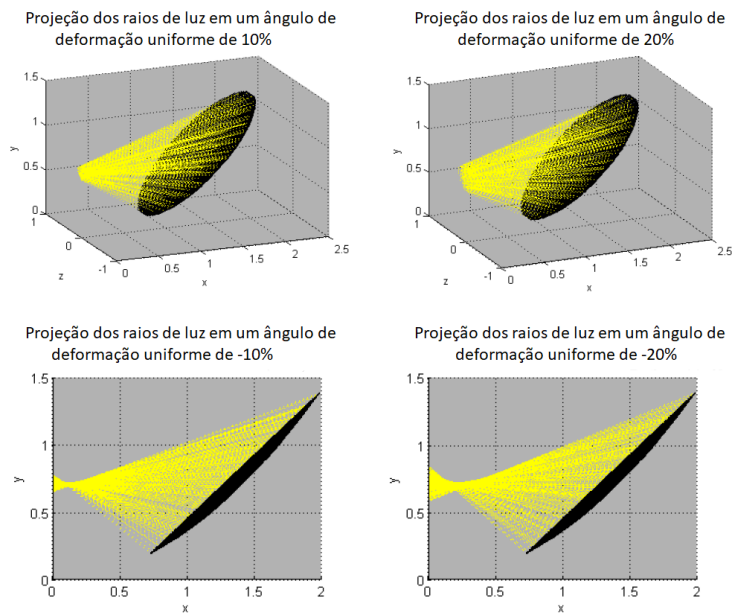


Figura 3.6: Projeção do foco a partir da deformação uniforme da superfície do refletor. O foco teórico se concentra depois do plano focal (yz) nas imagens superiores e antes do plano focal nas imagens inferiores.

Fonte: Adaptado de Alberti (2014).

Alberti (2014) simulou a distribuição do fluxo no plano focal para diferentes níveis de imperfeições na superfície de um concentrador de Scheffler. Os perfis de intensidade nos eixos y e z se mostraram semelhantes a uma distribuição gaussiana. Os desvios levaram à dispersão da distribuição no foco caracterizada pelo alargamento da curva e redução do pico da intensidade (figura 3.7).

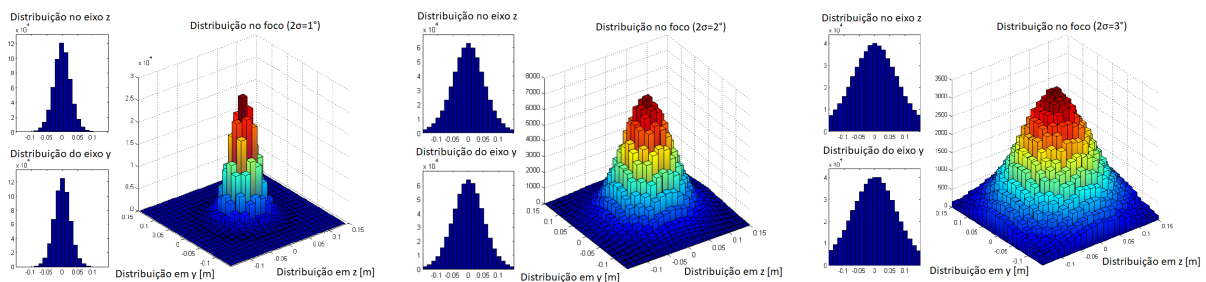


Figura 3.7: Distribuição gaussiana dos feixes no plano de projeção conforme se distanciou do plano focal teórico, em que 2σ é o desvio padrão da distribuição de Gauss.

Fonte: Adaptado de Alberti (2014).

4 FORMAÇÃO DA IMAGEM E MEDIÇÃO DO FLUXO DE ENERGIA NA ZONA FOCAL

4.1 Formação da imagem em concentradores de Scheffler

As análises da imagem focal em relação à geometria e ao perfil de fluxo são bastante utilizadas na literatura e auxiliam no desenvolvimento de receptores para os diferentes sistemas de concentração. Essas análises são regularmente realizadas pelo método de *ray tracing* de Monte Carlo como nos trabalhos de Xia, Dai e Shuai (2012), Abuseada e Ozalp (2020), Xiao et al. (2020), Qiu et al. (2015), He et al. (2017), Alberti (2014) e Shuai, Xia e Tan (2008) apresentados no capítulo 3. Como uma forma de aprofundar o entendimento do processo de formação da imagem de concentradores de Scheffler, a formulação matemática em relação a ambos os aspectos foi desenvolvida de modo inédito no trabalho de Dib (2021) por meio de uma análise geométrica dos feixes refletidos pelo concentrador que interceptam o plano focal.

Neste presente trabalho, os aspectos geométricos para o estudo dos efeitos da sazonalidade na formação da imagem em concentradores de Scheffler foram baseados na estimativa dimensional desenvolvida por Dib (2021), embasada no modelo de cone óptico de Duffie e Beckman (2013) para concentradores parabólicos. O Sol foi considerado como um disco que projeta os feixes de radiação em uma área infinitesimal de uma superfície (dA) como um cone de ângulo igual a $2\theta_s$, em que $\theta_s \approx 4,65 \text{ mrad} \approx 0,27^\circ$. O ângulo de incidência corresponde ao meio ângulo do cone óptico (θ_s) formado entre os feixes que partem do centro do disco solar direcionados para uma área infinitesimal do refletor e os feixes que partem da borda do disco solar. Um feixe que incide sobre um concentrador em condições ideais é refletido com um mesmo ângulo de abertura (DIB, 2021).

Concentradores reais possuem imperfeições na superfície e na estrutura que provocam um aumento do ângulo do cone refletido (DIB, 2021). Além disso, como mostrado em Neumann et al. (2002), a dispersão da radiação altera a distribuição da luminosidade conforme a composição da atmosfera e resulta em um alargamento visível do disco solar e a formação de uma auréola. Essa

porção é chamada de região circunsolar, cujo raio pode variar de 0 mrad a 30 mrad. A projeção do sol feita pelo concentrador incorpora as características da distribuição de luminosidade da região solar e circunsolar de acordo com os desvios provocados pelos elementos ópticos. A forma do Sol influencia o desempenho óptico dos sistemas de concentração solar (NEUMANN et al., 2002).

Um pireliômetro é o instrumento normalmente utilizado para a medição de DNI. Este instrumento possui um meio ângulo de visão de cerca de 50 mrad considerado amplo e insensível à distribuição de brilho. O objetivo do trabalho de Neumann et al. (2002) foi obter os perfis representativos do sol para as diferentes condições atmosféricas para que as modelagens se tornem mais realistas. A razão circunsolar (CSR) foi definida como a proporção da irradiância fornecida pela auréola solar (I_{CS}) em relação à soma da irradiância fornecida pelo disco (I_S) e auréola como mostra a equação 4.1 (NEUMANN et al., 2002).

$$CSR = \frac{I_{CS}}{I_{CS} + I_S} \quad (4.1)$$

Foram selecionados seis perfis típicos chamados de CSR 0, CSR 5, CSR 10, CSR 20, CSR, 30 e CSR 40. Os perfis podem não representar exatamente o valor calculado na prática. Este é o caso do CSR 0 que representa um Sol em um dia claro em que a medição atinge o limite da resolução, ao invés de um Sol completamente sem auréola. A figura 4.1 mostra os perfis médios, cuja intensidade foi normalizada para 1 em seu centro. Quando os valores de CSR são mais altos, a intensidade nas proximidades da auréola (entre 4,8 e 6 mrad) pode exceder a 10% do valor do pico. Em condições de céu limpo, em que o CSR é muito baixo, a intensidade decai três ordens de magnitude (NEUMANN et al., 2002).

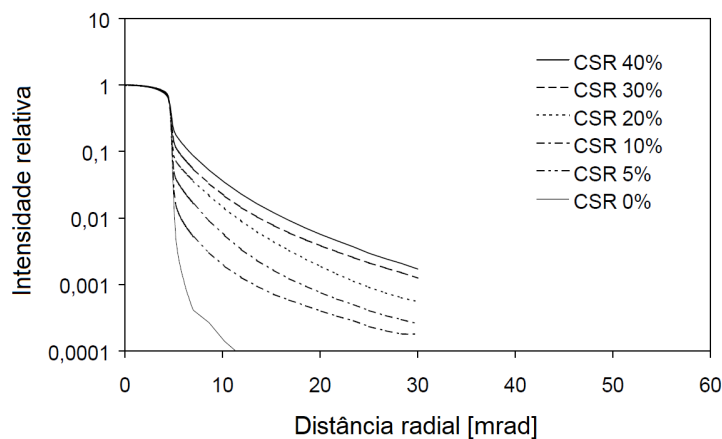


Figura 4.1: Comparação dos perfis médios de CSR.
Fonte: Adaptado de Neumann et al. (2002)

Trabalhos como o de Schubnell (1992) e Jeys e Vant-Hull (1976) identificaram que a intensidade da auréola solar em condições de céu limpo tem um efeito insignificante no valor do DNI mensurado pelo pireliômetro. Buscou-se a condição de um dia ensolarado e sem nuvens para a realização dos experimentos do presente trabalho.

As figuras 4.2 e 4.3 mostram o esquema de reflexão dos feixes visto nos planos xy e xz , respectivamente. Os feixes de radiação incidem na superfície refletora como um cone de ângulo de abertura igual a $2\theta_s$. Concentradores reais apresentam imperfeições que resultam em um aumento do ângulo refletido (DIB , 2021). O aumento do ângulo de reflexão ($2\theta_c$) é provocado pelas incertezas presentes em sistemas reais, que ocorrem principalmente nos espelhos, estrutura do concentrador, sistema de rastreamento, sistema de fixação e em outros elementos que envolvem o sistema de concentração. De modo geral, o aumento do ângulo de abertura do cone pode ser dividido em duas componentes (equação 4.2), que representam os desvios causados pelos espelhos ($2\theta_m$) e estrutura do concentrador ($2\theta_b$).

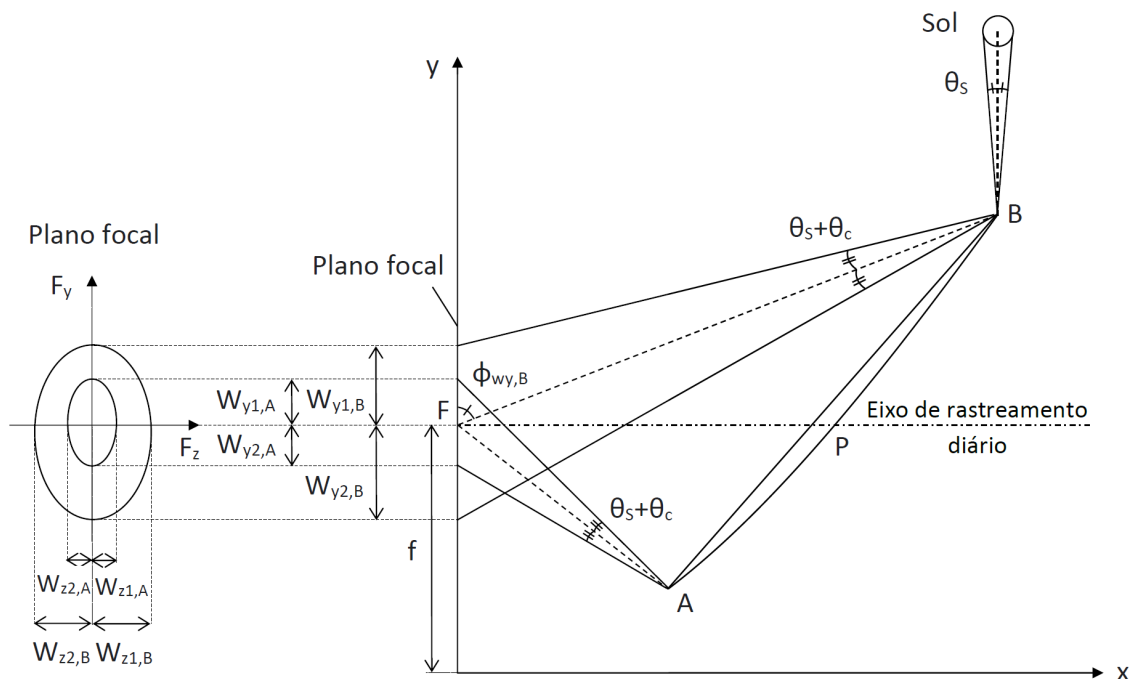


Figura 4.2: Esquema no plano xy da formação da imagem de um concentrador de Scheffler no equinócio.

Fonte: Elaborado pela Autora.

$$2\theta_c = 2\theta_m + 2\theta_b \quad (4.2)$$

Os feixes são projetados no plano focal (plano yz) com coordenadas F_y e F_z e origem no ponto

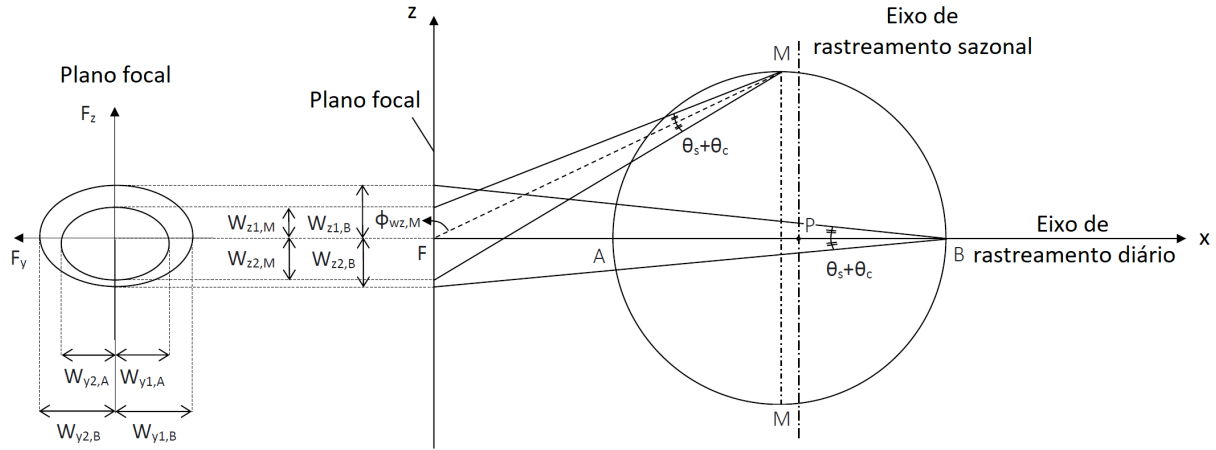


Figura 4.3: Esquema no plano xz da formação da imagem de um concentrador de Scheffler no equinócio.

Fonte: Elaborado pela Autora.

F (foco nominal). O conjunto de projeções do sol de cada área infinitesimal do refletor forma a imagem do concentrador de Scheffler. A projeção apresenta geometria circular somente quando o cone refletido no plano focal é reto. Caso contrário, torna-se elíptica. Os feixes provenientes do centro do disco solar convergem para o foco nominal, e o seu comprimento pode ser calculado pela equação 4.3 conforme as coordenadas x_{fe} , y_{fe} e z_{fe} do ponto de reflexão, de modo que f é a distância entre F e a origem do sistema de coordenadas do concentrador no equinócio (DIB, 2021).

$$fe = \left| \left[x_{fe}^2 + (y_{fe} - f)^2 + z_{fe}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right| \quad (4.3)$$

Dib (2021) desenvolveu as equações das dimensões da imagem produzida pelos pontos de reflexão (equações 4.4 a 4.6), de acordo com os ângulos formados entre o feixe e o semieixo na coordenada positiva da imagem (equações 4.7 e 4.8). As componentes da imagem foram divididas em semieixos a partir da origem em F . Os subíndices 1 e 2 indicam a componente sobre a coordenada positiva e negativa, respectivamente. Assim, o valor de cada eixo da imagem é dado pela soma dos semieixos das coordenadas correspondentes (equações 4.9 e 4.10).

$$\text{Semieixo } w_{y1} \begin{cases} w_{y1} = fe \frac{\sin(\theta_c + \theta_s)}{\sin(\phi_{wy} - \theta_c - \theta_s)}, \text{ se } \phi_{wy} < 90^\circ \\ w_{y1} = fe \frac{\sin(\theta_c + \theta_s)}{\sin(\phi_{wy} + \theta_c + \theta_s)}, \text{ se } \phi_{wy} > 90^\circ \\ w_{y1} = fe \times \tan(\theta_c + \theta_s), \text{ se } \phi_{wy} = 90^\circ \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\text{Semieixo } w_{y2} \left\{ \begin{array}{l} w_{y2} = fe \frac{\sin(\theta_c + \theta_s)}{\sin(\phi_{wy} + \theta_c + \theta_s)}, \text{ se } \phi_{wy} < 90^\circ \\ w_{y2} = fe \frac{\sin(\theta_c + \theta_s)}{\sin(\phi_{wy} - \theta_c - \theta_s)}, \text{ se } \phi_{wy} > 90^\circ \\ w_{y2} = fe \times \tan(\theta_c + \theta_s), \text{ se } \phi_{wy} = 90^\circ \end{array} \right. \quad (4.5)$$

$$\text{Semieixos } w_z \left\{ \begin{array}{l} w_{z1} = fe \frac{\sin(\theta_c + \theta_s)}{\sin(\phi_{wz} + \theta_c + \theta_s)}, \text{ se } \phi_{wz} < 90^\circ \\ w_{z2} = fe \frac{\sin(\theta_c + \theta_s)}{\sin(\phi_{wz} - \theta_c - \theta_s)}, \text{ se } \phi_{wz} > 90^\circ \\ w_z = 2 \times fe \times \tan(\theta_c + \theta_s), \text{ se } \phi_{wz} = 90^\circ \end{array} \right. \quad (4.6)$$

$$\cos(\phi_{wy}) = \left| \frac{y_f - y_{fe}}{fe} \right| \quad (4.7)$$

$$\cos(\phi_{wz}) = \left| \frac{z_{fe}}{fe} \right| \quad (4.8)$$

$$w_y = w_{y1} + w_{y2} \quad (4.9)$$

$$w_z = w_{z1} + w_{z2} \quad (4.10)$$

Uma vez que a superfície refletora é flexível e as dimensões da imagem dependem da posição e do ângulo de reflexão, os pontos responsáveis por gerar a menor e maior imagem em um dado dia variam. Os conceitos de núcleo e fronteira foram definidos com base nas dimensões da imagem produzida por uma área infinitesimal do refletor. O núcleo corresponde à menor projeção, e a fronteira à maior. Todo o refletor contribui com uma parcela do fluxo na região do núcleo. Portanto, é nele em que ocorre a maior quantidade de energia por unidade de área.

A figura 4.4 mostra a variação das dimensões da fronteira e do núcleo da imagem de um concentrador de Scheffler de 2 m² obtida na simulação de Dib (2021). Observou-se que a curva da componente em y da fronteira coincidiu com a projeção do ponto B até n se aproximar de 130, momento em que a projeção do ponto A passou a produzir a maior imagem. No caso da componente em z, a curva da fronteira foi resultado da projeção de outros pontos do refletor. A

curva de $W_{z,max}$ apresentou a menor variação anual, enquanto a de $W_{y,min}$ a maior. Em relação ao núcleo, $W_{z,min}$ coincidiu com a projeção dos feixes refletidos pelo ponto A. É possível notar nas curvas do núcleo e fronteira um aspecto cíclico com simetria em datas próximas aos solstícios.

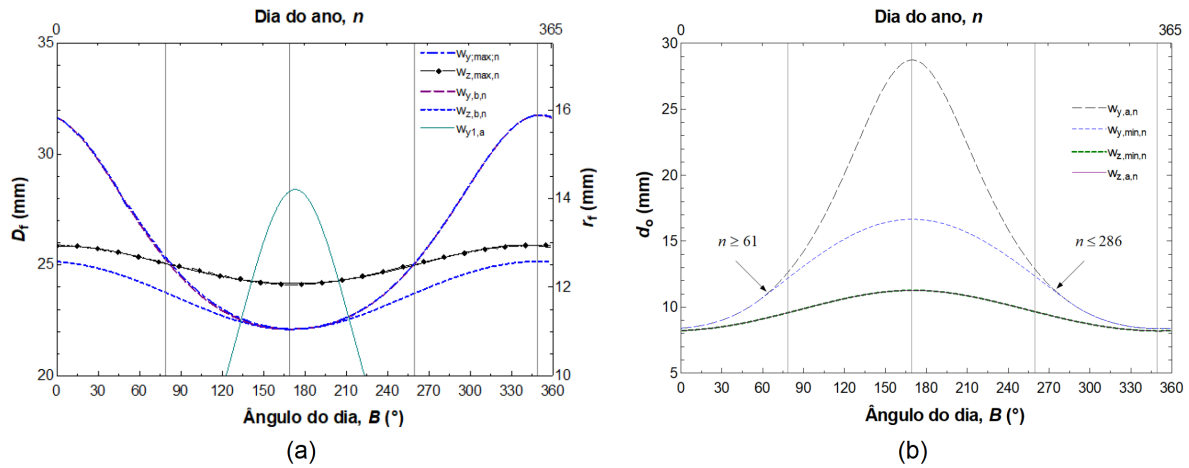


Figura 4.4: (a) Variação da fronteira da imagem (D_f) de um SS. (b) Variação do núcleo da imagem (d_o) de um SS.

Fonte: Dib (2021).

4.2 Medição do fluxo de energia na zona focal

Os sistemas de alta concentração solar são capazes de elevar a temperatura na região focal em um período de tempo curto. A caracterização óptica do foco é importante para determinar as características físicas dos receptores para que sejam compatíveis com o fluxo de calor (CISNEROS-CÁRDENAS et al., 2020). A eficiência de receptores solares é estimada pela relação entre a energia térmica de saída e a energia radiante incidente na abertura do receptor. A integral do fluxo de calor na superfície determina a potência radiante incidente. Assim, a medição do fluxo se torna essencial para o cálculo da eficiência do receptor (BALLESTRÍN et al., 2019).

De modo geral, existem dois métodos (direto e indireto) para mensurar a distribuição do fluxo solar na zona focal. O método direto consiste em medir o fluxo com um equipamento que se move por uma matriz sob o plano focal. Contudo, a sua resolução espacial é baixa, o que o faz ser aplicado com frequência em combinação com o método indireto (XIA; DAI; SHUAI, 2012).

Por sua vez, o método indireto utiliza uma câmera digital para fotografar o mapa de fluxo solar concentrado projetado em uma placa com propriedade lambertiana posicionada no plano focal. Visto que esse método não mede o valor do fluxo diretamente, este é obtido após o processamento dos dados e a calibração do sistema (XIA; DAI; SHUAI, 2012). Em relação ao método direto,

o método indireto possui um nível de complexidade reduzido por não exigir muitos pontos de aferição e dispensar o uso de peças móveis e resulta em uma maior resolução espacial do fluxo (LI et al., 2021). Por essas razões, o método indireto foi o escolhido para a caracterização óptica deste trabalho.

A superfície lambertiana é obtida por um processo de “jateamento de areia” de uma placa metálica (CISNEROS-CÁRDENAS et al., 2020). O jateamento faz com que a mesma luminância seja refletida em todas as direções dentro de uma faixa angular na qual é observada. Assim, toda a radiação que intercepta a placa é detectada pela câmera, o que faz com que os pixels da fotografia representem com acurácia o fluxo medido ainda que a câmera esteja direcionada para o alvo com uma ligeira abertura angular (BALLESTRÍN et al., 2019).

A fotografia do alvo lambertiano corresponde a uma distribuição de níveis de intensidade em uma escala de cinza, representa o modo como que os feixes chegam ao receptor. É preciso calibrar o sistema para associar um valor de cinza a uma dada irradiância e convertê-lo no valor da energia solar correspondente de cada pixel (BALLESTRÍN et al., 2019). Esse processo é possível devido à característica da superfície lambertiana de possuir uma luminosidade proporcional e linear ao fluxo de energia local (LI et al., 2021).

Diferentes formas de calibração do sistema são encontradas na literatura. Ballestrín et al. (2019) apresentaram um método de caracterização do fluxo de radiação no plano focal de um concentrador por meio de um alvo lambertiano, uma câmera e um radiômetro e compararam os resultados com os obtidos por medição direta com os mesmos equipamentos. Os feixes solares foram direcionados paralelos entre si por helióstatos para um concentrador parabólico, de modo que a quantidade de radiação incidente pôde ser controlada por um obturador instalado entre o helióstato e o concentrador. No plano focal foi posicionado um receptor circular e uma placa móvel composta por um alvo lambertiano e um radiômetro (figura 4.5).

Os testes foram realizados em horário próximo ao meio-dia em condições de céu limpo com uma câmera Hamamatsu com sensor CMOS de 16 bits de resolução em intensidade luminosa. Os sensores CCD e CMOS são compostos por células fotossensíveis (pixels) que transformam a energia luminosa de entrada de cada ponto da imagem em um sinal elétrico de intensidade proporcional. Três filtros de densidade neutra de 1 OD, 3 OD e 4 OD foram utilizados para evitar a supersaturação da luz.

A calibração foi feita igualando a potência solar incidente pelo produto entre a irradiação total

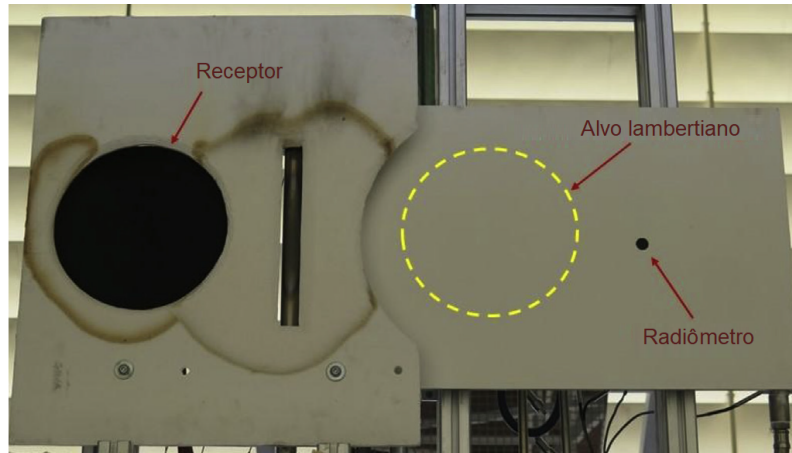


Figura 4.5: Estrutura composta por receptor, alvo lambertiano e radiômetro utilizada para a medição da radiação do concentrador solar.
Fonte: Adaptado de Ballestrín et al. (2019).

e a área do receptor dividida por pixel (equação 4.11). A irradiância total foi definida pela soma das irradiâncias de todos os pixels presentes na imagem do receptor (equação 4.12). A partir dessa conversão, a fotografia em escala de cinza (figura 4.6a) foi transformada em uma distribuição de irradiância como mostrada na figura 4.6(b). A distribuição de irradiância sofreu uma variação de apenas 2% entre as duas formas de medição. A figura 4.6(c) mostra que a relação entre os níveis de cinza e a irradiação registrada pelo radiômetro foi linear.

$$P = I_T \frac{A}{N} \quad (4.11)$$

$$I_T = \sum_{i=1}^N I_i \quad (4.12)$$

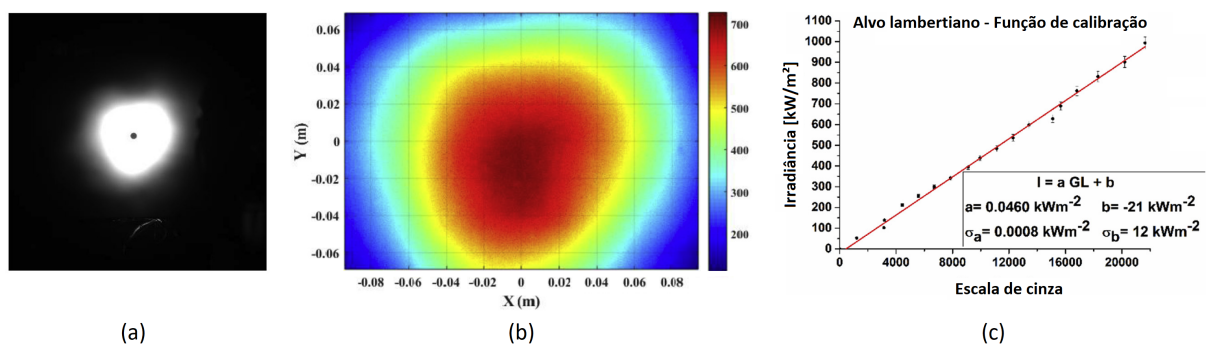


Figura 4.6: (a) Fotografia em escala de cinza da energia solar concentrada no alvo lambertiano (b) Distribuição do fluxo de energia solar concentrada no alvo lambertiano para uma irradiância de 690 kW/m^2 . (c) Função de calibração da escala de cinza.
Fonte: Ballestrín et al. (2019).

Li et al. (2021) apresentaram um método de medição indireto modificado para medir o fluxo focal de um simulador solar de alto fluxo de 30 kW_e composto por três lâmpadas. O experimento foi realizado com um sensor de Gardon instalado no interior de um alvo lambertiano móvel resfriado a água (figura 4.7). Esse método se diferencia porque nele o valor de cinza foi extraído da imagem resultante da sobreposição das fotografias do alvo tiradas com o acionamento individual das lâmpadas do simulador com o objetivo de evitar danos ao alvo lambertiano devido à elevada potência (figura 4.8).

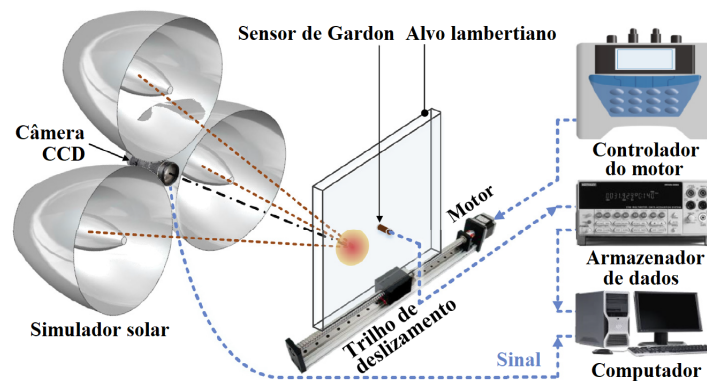


Figura 4.7: Configuração dos equipamentos utilizados no experimento.

Fonte: Adaptado de Li et al. (2021).

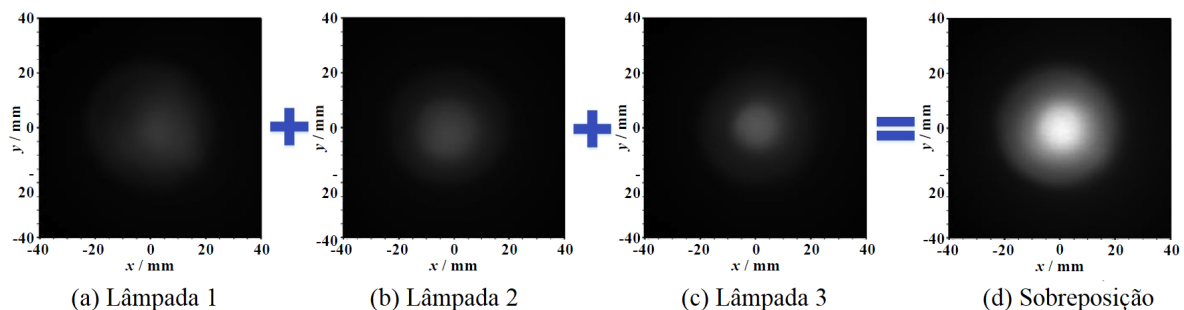


Figura 4.8: Sobreposição das fotografias do alvo gerado pelas lâmpadas quando a potência aplicada em cada uma foi de 2 kW_e.

Fonte: Adaptado de Li et al. (2021).

O procedimento de Li et al. (2021) considerou que o fluxo foi proporcional a um valor de cinza corrigido (g_i) para eliminar os efeitos da corrente escura do sensor e da iluminação ambiental, o qual foi calculado pela equação 4.13, em que N_L é a quantidade de lâmpadas. A correção foi feita ao fotografar dez imagens da energia solar concentrada e calcular o valor médio em cada pixel ($g_{on,i}$). Em seguida, o simulador foi desligado e outras dez fotografias foram tiradas para o cálculo da média do valor de cinza nessa condição ($g_{off,i}$).

$$g_i = \sum_{j=1}^{N_L} (g_{on,i,j} - g_{off,i,j}), j=1, 2, \dots, N_L \quad (4.13)$$

O fluxo médio no interior da sonda (\bar{g}_{Gardon}) foi verificado em um círculo de 9 mm de diâmetro com o sensor de Gardon que foi utilizado para a calibração do valor de cinza proporcional ao fluxo conforme a equação 4.14. A relação entre o fluxo e o valor de cinza é linear e pode ser obtida pela equação 4.15.

$$\bar{g}_{Gardon} = \frac{\sum_i^{N_{Gardon}} g_i}{N_{Gardon}} \quad (4.14)$$

$$k = \frac{g_{Gardon}}{\bar{g}_{Gardon}} \quad (4.15)$$

A figura 4.9 mostra o contorno do fluxo das três lâmpadas e da sua sobreposição. A lâmpada 1 apresentou um fluxo assimétrico enquanto as lâmpadas 2 e 3 apresentaram um fluxo com geometria mais próxima à circular. O pico de cada lâmpada foi de 500,5 kW/m², 572,6 kW/m² e 722,4 kW/m², respectivamente. Essa diferença ocorreu principalmente devido ao processo de fabricação e instalação das lâmpadas e concentradores. O contorno do fluxo do simulador obtido pelo sistema modificado de mapeamento de fluxo indireto (figura 4.9d) se aproximou da distribuição gaussiana, na qual o fluxo diminuiu do centro para a margem. Além disso, observou-se que as distorções causadas pelas lâmpadas se cancelaram ao sobrepor as três fotografias. Quando diferentes valores de potência total foram aplicados, todas as distribuições de fluxo apresentaram formas semelhantes às gaussianas com grande simetria rotacional (figura 4.10).

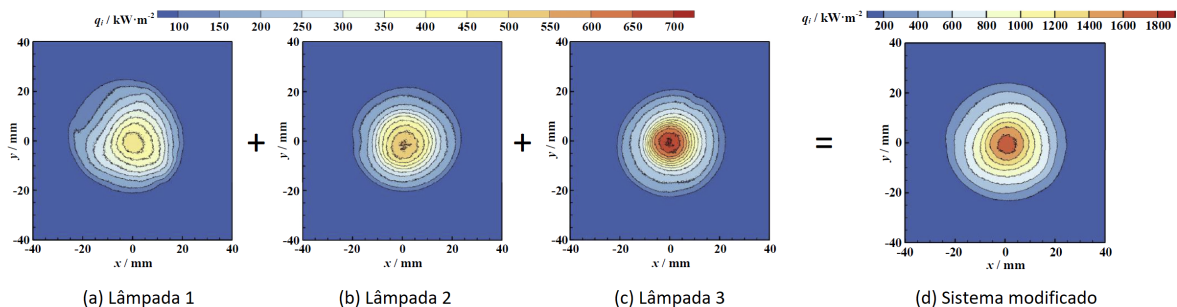


Figura 4.9: Contorno do fluxo obtido pelo método de medição indireto modificado quando a potência aplicada em cada lâmpada foi de 2 kWe.

Fonte: Adaptado de Li et al. (2021).

A análise mostrou que o sistema modificado é confiável. Os erros relativos ao fluxo e à potência acumulada foram de 7,94% e 7,96%, respectivamente. Apesar de o sistema modificado

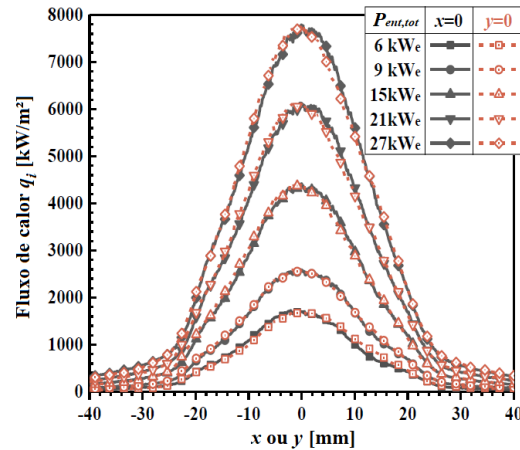
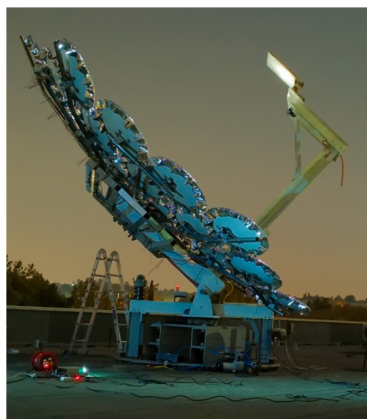


Figura 4.10: Distribuições de fluxo do simulador nos eixos x e y para as diferentes potências totais de entrada ($P_{ent,tot}$).

Fonte: Adaptado de Li et al. (2021).

resultar em um breve aumento dos erros causados pela sobreposição das imagens, uma das suas vantagens é a possibilidade de ampliar a faixa de potência de medição sem provocar danos ao alvo.

Em Roosendaal, Swanepoel e Roux (2020), dois pratos solares foram construídos com uma membrana a vácuo multifacetada e revestida com uma película aluminizada para determinar a distribuição de fluxo. Um dos pratos continha 33 facetas elípticas e o outro 6. As suas áreas de abertura efetiva eram de 15,57 m² e 2,7 m², respectivamente. O fluxo foi determinado com a iluminação de baixa intensidade de uma lua cheia por meio de uma câmera Canon EOS 700D com um sensor CMOS. Fotografias abaixo da saturação foram tiradas do foco projetado em um alvo lambertiano.



(a)



(b)

Figura 4.11: Pratos solares durante os testes lunares: (a) prato solar com 33 facetas elípticas e (b) prato solar com 6 facetas elípticas.

Fonte: Roosendaal, Swanepoel e Roux (2020).

Os valores de pixel foram normalizados em relação ao seu valor máximo na imagem e o mínimo esperado no limite da superfície do alvo para gerar um mapa de fluxo com valores escalonados entre 0 e 1. A razão de fluxo foi definida como a razão entre a intensidade do pixel i (E_i) e a intensidade máxima na imagem (E_{max}) que pode ser igualada à razão entre o fluxo no pixel i (I_i) e o pico do fluxo solar (I_{max}) (equação 4.16).

$$\text{Razão de Fluxo}_i = \frac{E_i}{E_{max}} = \frac{I_i}{I_{max}} \quad (4.16)$$

Assumi-se que a distribuição do fluxo solar na superfície do alvo era igual à distribuição de fluxo lunar normalizada e a potência total incidente na superfície do alvo correspondia à potência total refletida pela superfície refletora. Assim, o somatório dos valores dos pixels pôde ser associado à irradiação solar conforme a equação 4.17, em que ρ_e é a refletividade da superfície espelhada, A_{refl} é a área de abertura efetiva e A_{pixel} é a área do pixel. Deste modo, correlacionou-se a potência total incidente por área de pixel com a energia solar direta.

$$\rho_e A_{refl} DNI = \sum_i^N I_i A_{pixel} \quad (4.17)$$

O fator de interceptação corresponde à relação entre a intensidade incidente em uma área de abertura situada na placa pela intensidade total na superfície do alvo (equação 4.18). A abertura considerada possuía geometria quadrada, cujo centro foi determinado como o centroide da distribuição do fluxo lunar. O cálculo da razão de concentração geométrica foi feito a partir da razão entre a área de abertura efetiva do refletor e a área de abertura situada na placa (A_{ab}) (equação 4.19).

$$\gamma = \frac{\sum_i^n E_i}{\sum_i^N E_i} = \frac{\int_0^{ab} E(x,y) dx dy}{\int_0^{tot} E(x,y) dx dy} \quad (4.18)$$

$$CR_g = \frac{A_{refl}}{A_{ab}} \quad (4.19)$$

A figura 4.12 mostra a distribuição do fluxo em uma superfície tridimensional e bidimensional do alvo do concentrador solar com 33 facetas, e a figura 4.13 representa a distribuição do fluxo nos eixos x e y e o limite da abertura na superfície da placa de lado de 0,25 m. Observou-se que o formato da curva do lado externo da abertura se aproximou de uma horizontal, cuja intensidade

indicou que nessa região houve apenas uma zona de baixo fluxo.

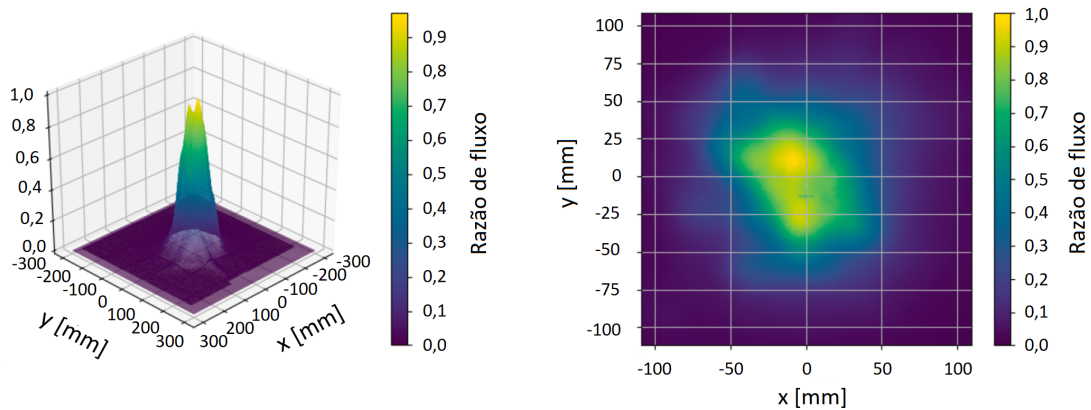


Figura 4.12: Distribuição do fluxo no plano focal do concentrador com 33 facetas.
Fonte: Adaptado de Roosendaal, Swanepoel e Roux (2020).

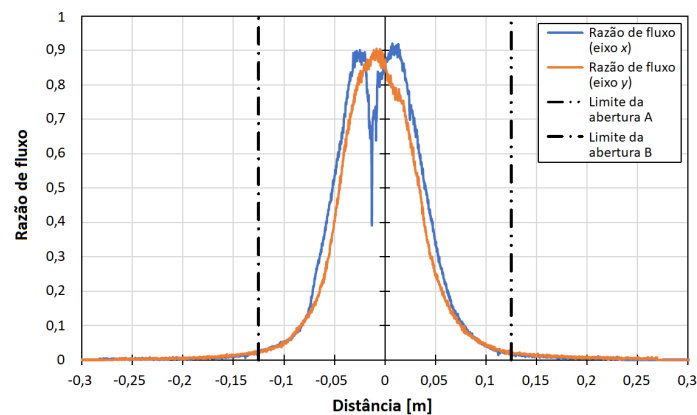


Figura 4.13: Distribuição do fluxo nos eixos y e z do concentrador com 33 facetas.
Fonte: Adaptado de Roosendaal, Swanepoel e Roux (2020).

As figuras 4.14 e 4.15 mostram a distribuição da razão de fluxo do concentrador solar com 6 facetas e a região limitada para a abertura de lado de 0,135 m. Do mesmo modo, houve apenas uma curva de baixo fluxo a partir do limite da abertura. A imagem formada foi menor e possuiu uma distribuição mais plana quando comparada com a do maior concentrador.

Os fatores de interceptação para os concentradores com 33 e 6 facetas foram calculados com base nas distribuições de fluxo. Foram obtidos os valores de 88,6% e 89,9%, respectivamente. Schmitz et al. (2017) analisaram um concentrador com características semelhantes, e as configurações foram comparadas por meio de um gráfico do fator de interceptação pela razão de concentração geométrica como mostrado na figura 4.16.

Constatou-se que o concentrador com 6 facetas apresentou um desempenho inferior para um

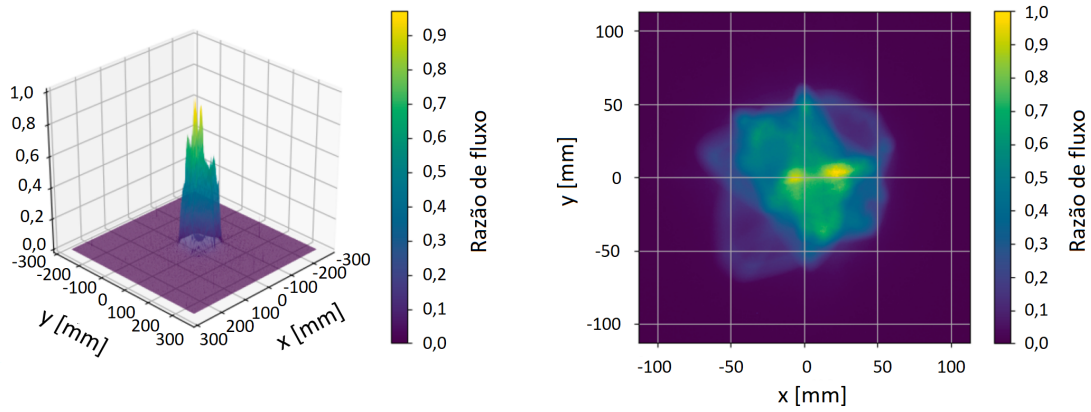


Figura 4.14: Distribuição do fluxo no plano focal do concentrador com 6 facetas.
Fonte: Adaptado de Roosendaal, Swanepoel e Roux (2020).

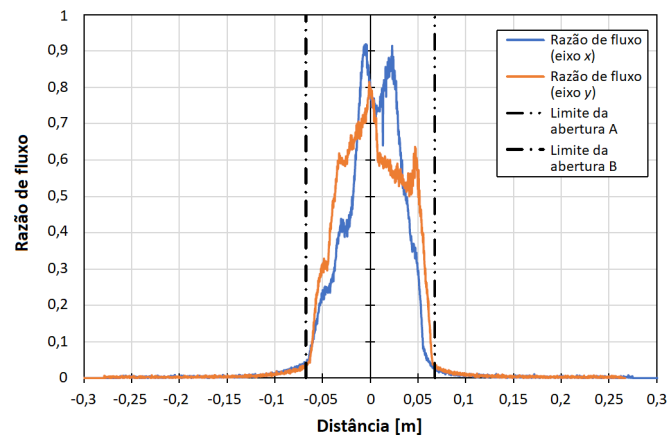


Figura 4.15: Distribuição do fluxo no plano focal do concentrador com 6 facetas.
Fonte: Adaptado de Roosendaal, Swanepoel e Roux (2020).

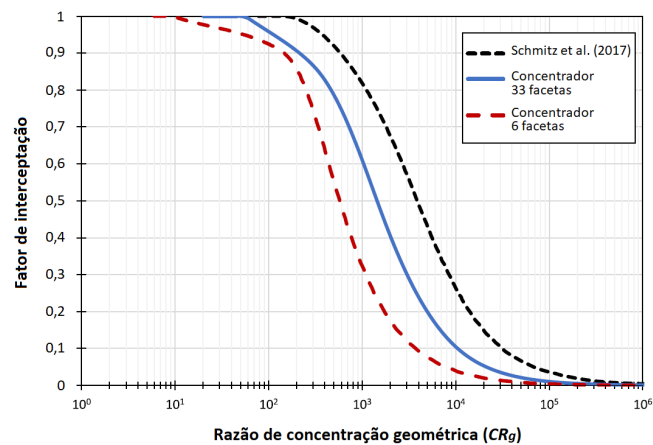


Figura 4.16: Gráfico comparativo do fator de intercepção em relação à razão de concentração geométrica dos concentradores.

Fonte: Adaptado de Roosendaal, Swanepoel e Roux (2020).

mesmo C_g em relação ao com 33 facetas. Um concentrador com menos quantidade de facetas pode ter um efeito mais significativo sobre o fator de interceptação caso uma delas tenha um desempenho reduzido. O desempenho dos concentradores pode ser melhorado com uma estratégia de calibração e direcionamento individual das facetas por meio de um sistema de rastreamento preciso e automatizado, ao invés de um rastreamento e direcionamento manual.

Xia, Dai e Shuai (2012) desenvolveram um método indireto de medição do fluxo solar concentrado de um concentrador com 16 pratos de 1 m de diâmetro com configuração paraboloide utilizando uma câmera infravermelha e um alvo lambertiano resfriado a água (figura 4.17). Os resultados experimentais foram comparados com a curva numérica gerada pelo método de *ray tracing* de Monte Carlo. Um erro de inclinação foi aplicado para representar os desvios de uma superfície espelhada real. O desvio correspondeu a uma combinação dos erros de inclinação da superfície, rastreamento, fabricação e instalação.

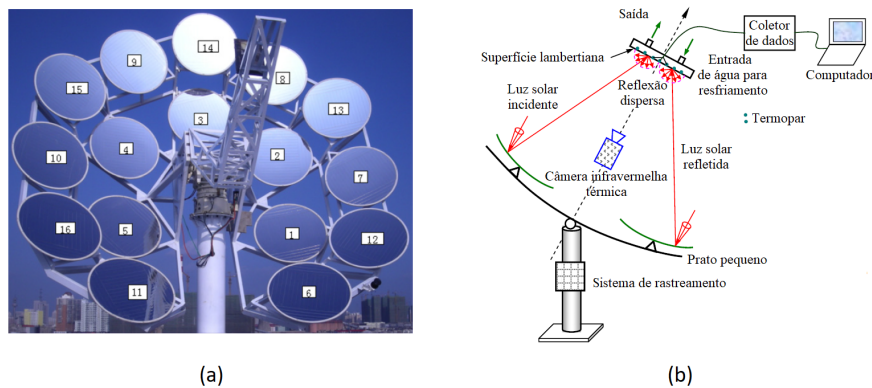


Figura 4.17: (a) Concentrador solar com 16 pratos paraboloides. (b) Sistema de captação de dados.

Fonte: Adaptado de Xia, Dai e Shuai (2012).

A figura 4.18(a) mostra a imagem infravermelha gerada sobretudo pela radiação solar refletida. A comparação entre as curvas dos dados experimentais e numéricos foi apresentada na figura 3.1 do capítulo 3. A distribuição do fluxo solar do concentrador se assemelhou à distribuição gaussiana, cujo pico foi atingido próximo ao centro da região focal e cujo valor decresceu de forma brusca até a borda. O resultado experimental foi compatível com a curva numérica para um desvio de 2,2 mrad, o qual foi considerado para a simulação do fator de interceptação em relação ao erro de rastreamento.

Como foi apresentada, a curva da fração de interceptação teve uma elevação acentuada com o aumento do raio e se assemelhou de modo gradual a um platô a partir de um raio próximo a 0,06 m. Em geral, esse erro é inferior a 3,0 mrad em concentradores com dois eixos de rastreamento

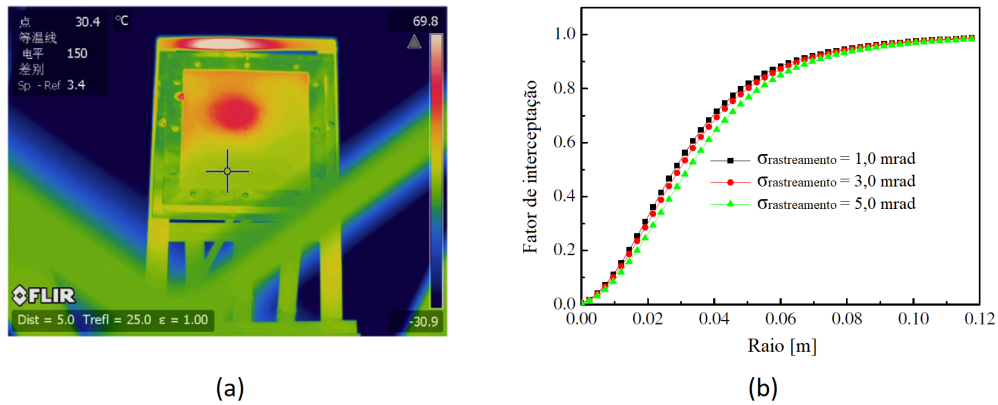


Figura 4.18: (a) Fotografia de temperatura infravermelha do alvo lambertiano. (b) Fator de interceptação para diferentes erros de rastreamento.

Fonte: Adaptado de Xia, Dai e Shuai (2012).

desse tipo. A fração de interceptação foi de até 0,8 ao adotar um raio de abertura de 0,06 m.

No trabalho de Dib (2021), foi feita a caracterização do fluxo de energia na imagem de um concentrador de Scheffler com área de abertura teórica de 2 m^2 no equinócio com uma superfície espelhada composta de folhas de alumínio anodizado com um θ_b de 12,5 mrad. Quatro experimentos em dias distintos foram feitos com um alvo lambertiano, uma câmera FLIR BlackFly GigE 88S6M-C PoE de resolução de 4096×2160 pixels e 16-bits equipada com um sensor CMOS e um pireliômetro para a calibração do sistema. Três filtros de densidade neutra foram utilizados para evitar a saturação do pixel.

O processamento dos dados foi feito no MATLAB a partir das fotografias do alvo lambertiano em escala de cinza (figura 4.19a). As fotografias foram consideradas como uma matriz, onde os valores de cinza de cada pixel corresponderam aos elementos da matriz nas suas respectivas posições. Desta forma, foi possível isolar a região de energia solar concentrada, a qual foi representada pela cor branca na figura 4.19(b). As imagens foram obtidas nos dias 7, 28, 103 e 342 e nomeadas de N2, K3, N4 e Q1, respectivamente.

A região do foco foi ajustada considerando apenas os valores de pixel da fotografia original maiores que 17% do valor da escala de 16 bit (figura 4.20a). Essa região foi utilizada para determinar o centroide do foco para posicionar os eixos de coordenadas F_y e F_z do plano focal. A matriz original foi multiplicada por um fator de combinação linear para que tornasse possível a visualização do entorno do foco (figura 4.20b). Uma reta paralela (eixo F_y) e outra perpendicular (eixo F_z) às bordas laterais do alvo que passam pelo centroide foram traçadas a partir dos pontos de fuga da perspectiva cônica como podem ser vistas na figura 4.20c.



Figura 4.19: (a) Fotografia original em escala de cinza da projeção do foco no alvo lambertiano do experimento Q1. (b) Região da energia solar concentrada isolada (em branco).

Fonte: Dib (2021).

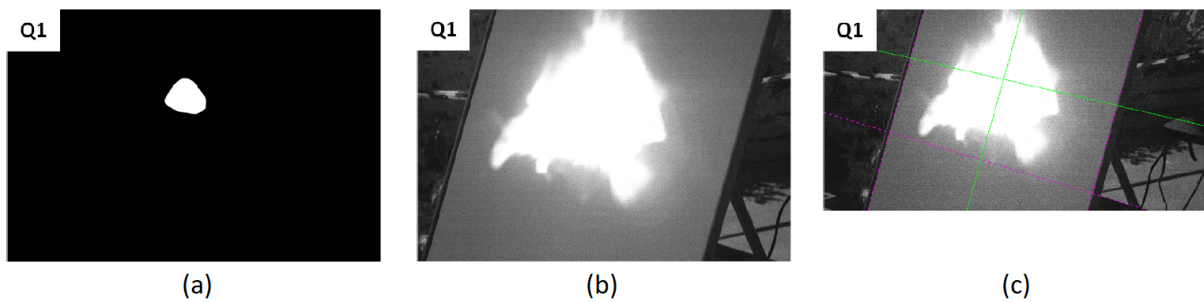


Figura 4.20: (a) Região do foco utilizada para a determinação do centroide. (b) Matriz da fotografia original multiplicada por um fator de combinação linear. (c) Eixos F_y e F_z do plano focal que se cruzam no centroide.

Fonte: Dib (2021).

A abertura do receptor foi considerada como circular devido à facilidade construtiva e ao custo de fabricação. Circunferências foram inseridas com o centro sobre o centroide para representá-la na fotografia. O fluxo de radiação total no foco foi calculado de duas maneiras. A equação 4.20 o determina a partir do valor de DNI e da área de abertura (A_{ap}) multiplicada por um fator de área útil (ζ_{ap}), o qual corresponde à proporção que de fato é espelhada (equação 4.21). A_e é a área do refletor não espelhada, como a região entre os espelhos e das partes estruturais no interior da borda elíptica, e A_{ap} é a área de abertura teórica do concentrador em um dado dia n . A área de abertura efetiva foi aferida com um paquímetro digital, e foram obtidos os valores de $A_e = 0,013 \pm 0,001$ m² e $\zeta_{ap} = 0,995 \pm 0,001$.

$$G_f = DNI \times \rho_e \times A_{ap} \zeta_{ap} \pm \delta_{G_f} \quad (4.20)$$

$$\zeta_{ap} = \frac{A_{ap} - A_e}{A_{ap}} \pm \delta_{\zeta} \quad (4.21)$$

A equação 4.22 descreve o fluxo total pela multiplicação da soma dos valores da escala de cinza dos pixels da imagem (V_{cinza}) por um fator de cinza (F_{cinza}), o qual foi calibrado a partir das equações 4.20 e 4.22 e correspondeu à inclinação da curva de ajuste. O fluxo em um pixel foi determinado pela equação 4.23, em que $V_{cinza,ij}$ é o valor da escala de cinza no pixel localizado na linha i e coluna j da fotografia.

$$G_f = F_{cinza} \times \sum_{ij} V_{cinza} \quad (4.22)$$

$$g_{f,ij} = F_{cinza} \times V_{cinza,ij} \quad (4.23)$$

O ângulo óptico referente ao processo construtivo (θ_b) foi obtido de modo iterativo ao relacionar as dimensões teóricas dos semieixos com a projeção no alvo observada nas fotografias. O valor que melhor se ajustou às quatro imagens foi de 35 mrad. Desta forma, obteve-se que o θ_c do concentrador estudado foi de 47,5 mrad segundo a equação 4.2. Diferentes raios de abertura do receptor foram considerados para o cálculo do fator de interceptação, cujos valores foram equivalentes aos dos semieixos teóricos do núcleo ($W_{y,min}$ e $W_{z,min}$) e fronteira ($W_{y,max}$ e $W_{z,max}$) nas respectivas datas dos experimentos (figura 4.21). O fator de interceptação foi definido como a razão entre o fluxo de calor na abertura do receptor e o fluxo refletido pelo concentrador (equação 4.24).

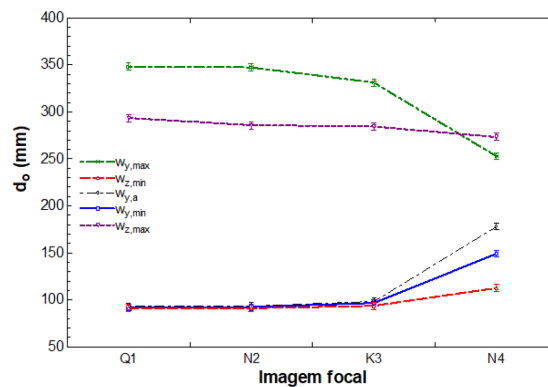


Figura 4.21: Comprimentos dos semieixos do núcleo e fronteira das imagens Q1, N2, K3 e N4 para um $\theta_c = 47,5$ mrad.

Fonte: Dib (2021).

$$\gamma = \frac{\iint_0^{f_{receptor}} G_f(y,z) dw_y dw_z}{DNI \times \rho_e \times A_{ap} \zeta_{ap}} \quad (4.24)$$

A figura 4.22 mostra a superfície do fluxo da energia nas imagens analisadas. Os resultados de Dib (2021) referentes ao fator de interceptação foram apresentados em formato de gráfico de barras na figura 4.23. Foi considerado que a variação da área de abertura do concentrador ocorreu a partir da deformação ideal de sua estrutura. Os valores variaram de 0,87 a 0,99 para as dimensões da fronteira e de 0,41 a 0,65 para as dimensões do núcleo.

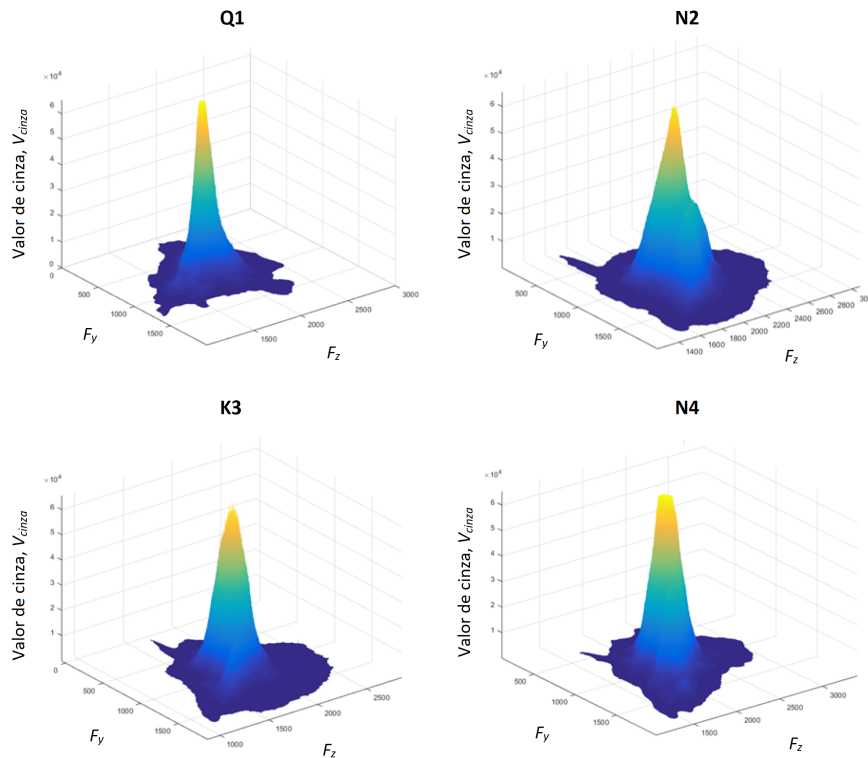
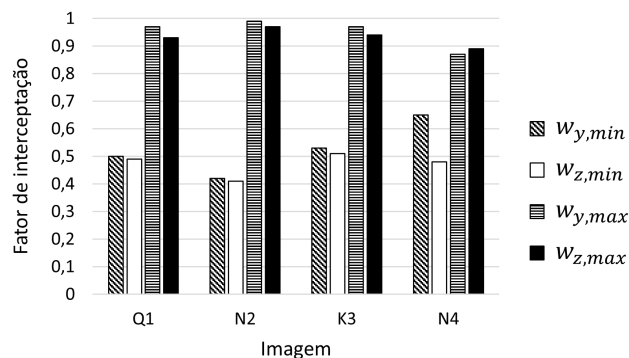


Figura 4.22: Distribuição do fluxo de energia nas imagens Q1, N2, K3 e N4.
Fonte: Dib (2021).



Dados: Dib (2021)

Figura 4.23: Fator de interceptação das quatro imagens analisadas.

A tendência esperada era que a imagem Q1 apresentasse a menor interceptação de fluxo para os diâmetros do núcleo ao considerar as dimensões teóricas de abertura do concentrador e da imagem. Contudo, a menor interceptação foi observada em N2. A distribuição da luminosidade e a

geometria do foco obtidas nos experimentos indicaram que essa divergência pode estar relacionada às deformações na superfície do refletor causadas pelo acionamento do sistema de rastreamento sazonal. Variações podem ocorrer em um único e entre diferentes concentradores de Scheffler, visto que a deformação da estrutura é influenciada pelos materiais e perfis geométricos utilizados na fabricação, como os pontos de soldagem e a usinagem dos componentes.

A metodologia escolhida para a análise da imagem do concentrador do presente trabalho foi a descrita em Dib (2021). Utilizou-se dados históricos do pireliômetro para a calibração do sistema devido à ausência de aferições no ano e em todas as datas de realização dos experimentos. As curvas correspondentes a dias com condições de predominância de céu aberto foram identificadas a partir de um estudo do índice de claridade (K_t), um parâmetro associado ao grau de cobertura do céu.

A radiação global (I) é composta pelas parcelas de radiação direta (I_b) e difusa (I_d). A razão entre a radiação global e a radiação no topo da atmosfera (I_o) corresponde ao índice de claridade, o qual se relaciona com a proporção de irradiação difusa por meio da fração difusa (k_d) conforme a equação 4.25 (DIEZ et al., 2021).

$$k_d = \begin{cases} 0,995 - 0,081k_t, & \text{se } k_t \leq 0,21 \\ 0,724 + 2,738k_t - 8,32k_t^2 + 4,967k_t^3, & \text{se } 0,21 < k_t \leq 0,76 \\ 0,18, & \text{se } 0,76 < k_t \end{cases} \quad (4.25)$$

Em Gomes et al. (2007), definiu-se que a cobertura do céu é extremamente nublada quando $K_t \leq 0,2$, a cobertura é nebulosa quando $0,2 < K_t \leq 0,35$, o céu está parcialmente nublado com predominância difusa quando $0,35 < K_t \leq 0,55$, o céu está parcialmente nublado com predominância de céu aberto quando $0,55 < K_t \leq 0,65$ e o céu está sem nuvens quando $K_t > 0,65$ (GOMES et al., 2007). Na análise dos dados do pireliômetro, desconsiderou-se a parcela de radiação refletida pelo solo, assim como no caso do concentrador estudado, em que somente os feixes incidentes e perpendiculares ao plano de abertura do concentrador foram considerados.

Em Diez et al. (2021), foi feita a modelagem dos componentes da irradiação solar a partir do posicionamento geográfico e ângulos solares, o que permite estimar a irradiação que incide em um dado local e intervalo de tempo de exposição. A irradiação solar horária extraterrestre pode ser calculada pela equação 4.26, em que I_{cs} é a constante solar igual a $0,082 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$, E_o

é o fator de excentricidade da Terra ($E_o = 1 + (0,033 \cos(2\pi J/365))$) e ω_1 e ω_2 são os ângulos solares no início e término do período considerado, respectivamente. Com esses parâmetros e a medida de irradiação solar direta aferida pelo pireliômetro, é possível estimar o índice de claridade e, portanto, as condições de cobertura do céu correspondentes a cada curva de dados.

$$I_o = \left(\frac{12 \times 60}{\pi} \right) I_{cs} E_o [\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1)] \quad (4.26)$$

5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

O objetivo definido neste trabalho foi avaliar a imagem focal de um concentrador de Scheffler em relação à sua geometria e energia média incidente. Para alcançá-lo, experimentos mensais de setembro de 2021 a agosto de 2022 foram realizados. Os dados foram coletados em condições de céu aberto e em horários próximos ao meio-dia solar. O método de calibração adotado foi o mesmo de Dib (2021) apresentado no capítulo 6. O capítulo atual descreve a determinação do local de instalação do concentrador, os equipamentos que compõe a bancada experimental, o pireliômetro utilizado para a calibração do sistema, os procedimentos de ajustes dos equipamentos e de condução do experimento e, por fim, o cálculo de incertezas das medições.

5.1 Determinação do local do concentrador

Os experimentos foram realizados nas instalações do prédio das Engenharias Mecânica, Meatrônica e Naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo ($23,55^\circ$ S, $46,73^\circ$ W). O local escolhido para posicionar o concentrador era cercado de edificações como mostrado na figura 5.1. Diante disso, um estudo de sombreamento foi realizado de modo a garantir que a luz solar incidisse sobre o concentrador em todos os dias do ano no horário do experimento.



Figura 5.1: Vista do local do experimento ao lado (a) Oeste e (b) Leste do concentrador.

A metodologia utilizada para o estudo de sombreamento seguiu as orientações de Duffie e

Beckman (2013). As construções e as árvores presentes nas imediações do local analisado foram consideradas como possíveis obstruções capazes de gerar sombra no refletor. Selecionou-se os pontos estratégicos para a análise mostrados na figura 5.2. O ponto O correspondeu ao local de instalação do concentrador, os pontos L e K a duas árvores nas proximidades e o ponto M a uma posição localizada na aresta do telhado ao Norte de O . As respectivas medidas da altura (h) de cada ponto considerado e a distância (d) entre a sua projeção no solo e o ponto O foram extraídas do local da instalação e da planta do edifício e dispostas na tabela 2.

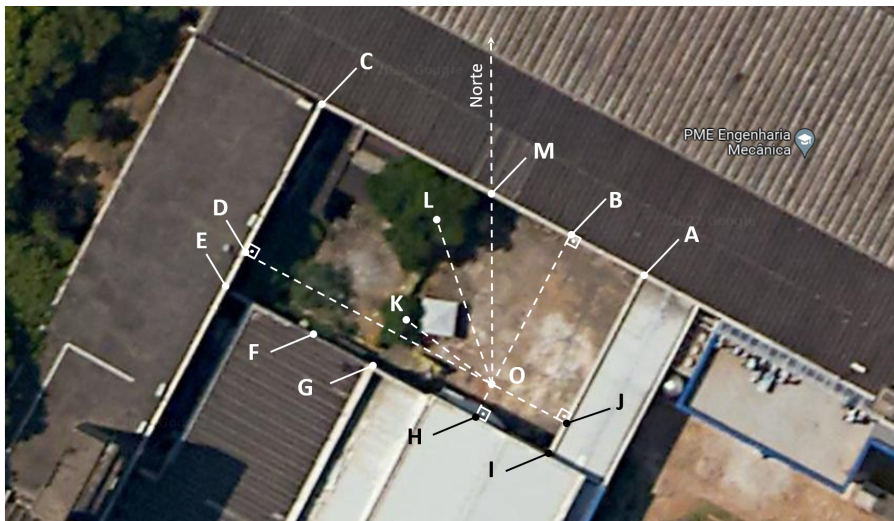


Figura 5.2: Vista superior do local do experimento extraída do Google Maps.

Tabela 2: Medidas do local do experimento.

Ponto	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
h [m]	9	9	9	9	9	9	9	9	9	6	9	9	9
d [m]	12,6	10,5	21,5	18,0	18,3	12,2	8,0	3,1	7,4	7,0	7,0	9,0	11,5

A partir das medidas apresentadas, as coordenadas angulares de altitude (α_o) e azimute (γ_o) representadas na figura 5.3 foram calculadas. As posições angulares foram introduzidas no diagrama de posição do Sol no céu. A sobreposição desses dados corresponde ao diagrama de sombreamento (figura 5.4), o qual permite observar o momento em que se forma sombra no concentrador pela região hachurada. Os meses de maio, junho e julho são aqueles em que se tem o menor intervalo de iluminação solar disponível. O período das 10h30 às 15h30, em que o concentrador está exposto diretamente ao sol sem interrupção, é suficiente para a realização dos experimentos. Diante dessa análise, o ponto O foi escolhido para a instalação do concentrador.

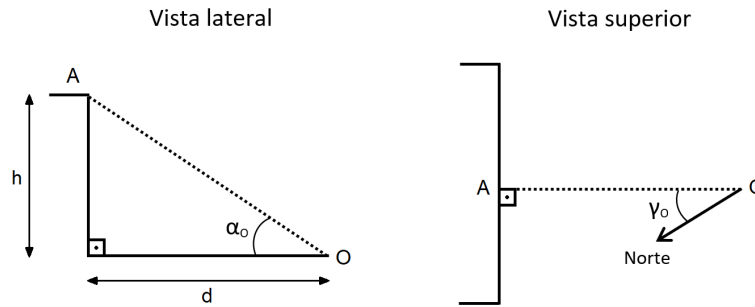


Figura 5.3: Representação dos ângulos de altitude e azimute do ponto de obstrução. O ponto A representa o ponto mais elevado de uma possível obstrução.

Fonte: Elaborado pela autora.

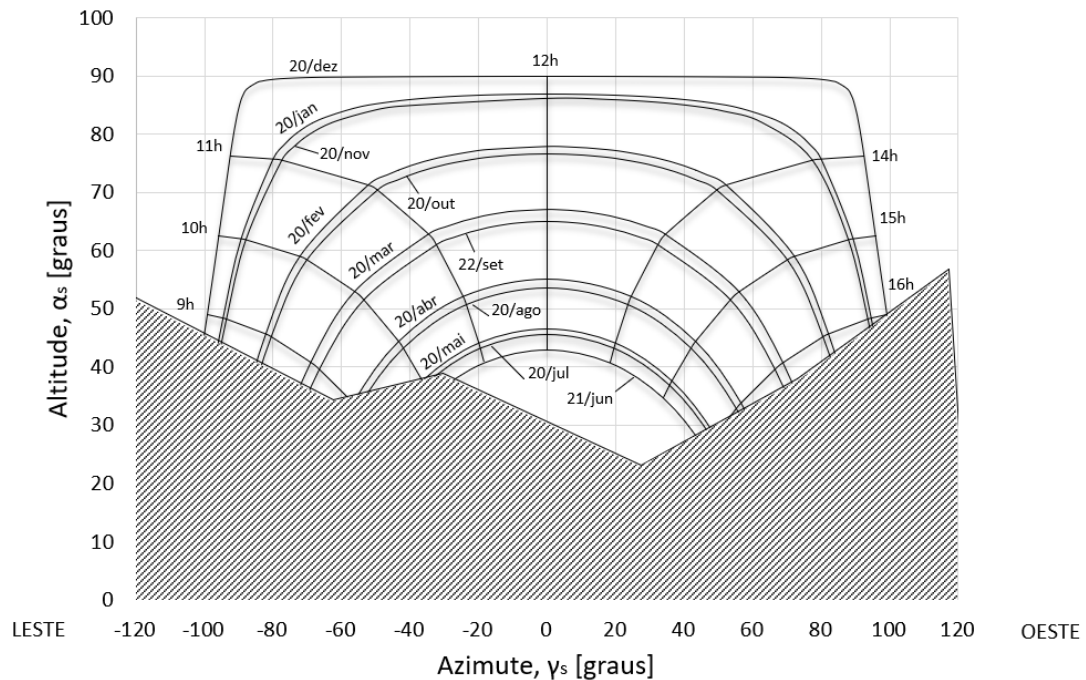


Figura 5.4: Diagrama de sombreamento do local de instalação do concentrador de Scheffler.

Fonte: Elaborado pela autora.

5.2 Bancada Experimental

Os experimentos foram realizados com um concentrador de Scheffler, uma placa lambertiana e uma câmera digital posicionados conforme a figura 5.5. O concentrador, a placa e a mesa da placa foram projetados e construídos por Dib (2021) e disponibilizados para este trabalho. A instalação do concentrador foi realizada na localização indicada na sessão 5.1 com a superfície refletora voltada para o Norte. Uma linha de referência na direção Norte-Sul foi esboçada no solo a partir de marcações semanais do sombreamento de uma haste a 90° do plano horizontal ao meio-dia

solar. Uma placa lambertiana foi colocada no plano focal para interceptar a radiação refletida.

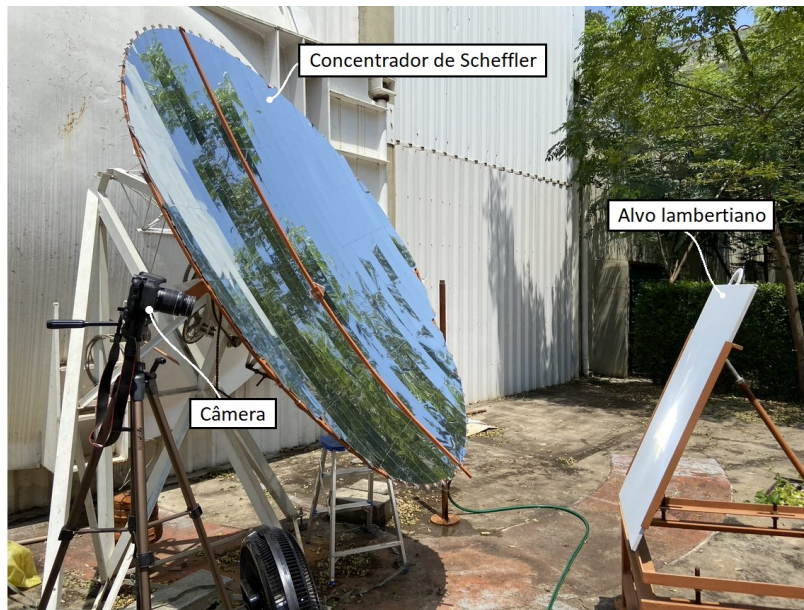


Figura 5.5: Bancada experimental.

A câmera foi disposta a uma altura (h_C) equivalente à do pivô central (h_P), e a sua projeção coincidiu com a projeção do eixo sazonal (figura 5.6). As projeções da câmera (ponto C) e do foco (ponto F) e a interseção das projeções do eixo diário e sazonal (ponto P) formam um triângulo retângulo no solo, cuja abertura angular no vértice F (α_F) foi de aproximadamente $35,5^\circ$. As medidas aferidas no local do experimento foram dispostas na tabela 3.

Tabela 3: Distâncias médias extraídas do local do experimento.

Distância	[m]
h_C	1,45
h_P	1,45
\overline{PC}	1,10
\overline{PF}	1,54
\overline{CF}	1,89

5.2.1 Concentrador de Scheffler

O concentrador de Scheffler estudado possuiu uma área de abertura teórica de 2 m^2 no equinócio, cujas vistas lateral e traseira foram ilustradas na figura 5.7. O seu projeto foi desenvolvido a partir dos manuais da Solare-Bruecke (2010). A base e o suporte do refletor foram construídos com aço carbono e são capazes de manter o conjunto estável durante o funcionamento do sistema de rastreamento diário. A estrutura do refletor foi constituída de aço carbono e barras de alumínio para a

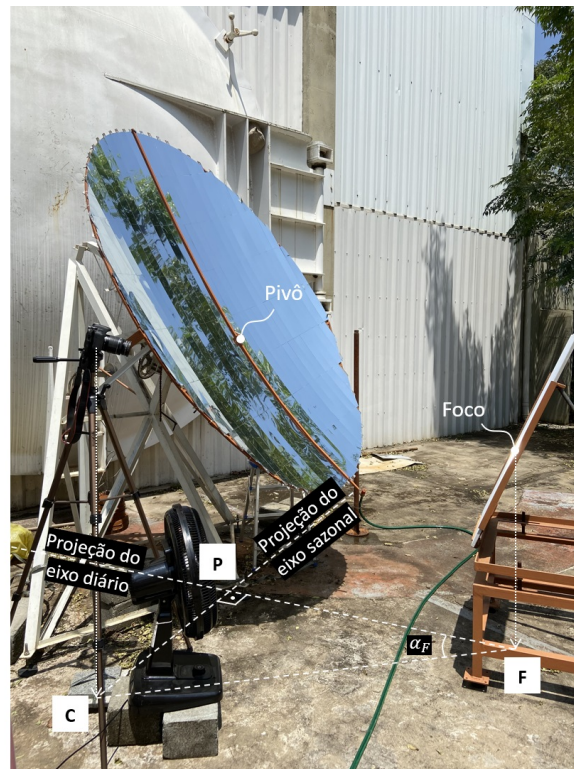


Figura 5.6: Posicionamento dos equipamentos no local do experimento.

fixação dos espelhos, os quais foram feitos com folhas de alumínio anodizado do tipo MIRO-SUN Wather-Proof Reflective 90 e fabricados pela Alanod. Os espelhos eram de geometria retangular com dimensões de 62,5 mm x 280 mm e espessura de 0,5 mm com um ângulo de abertura do cone óptico (θ_m) de 12,5 mrad e uma reflexão global de 95% de acordo com o fabricante (DIB, 2021).

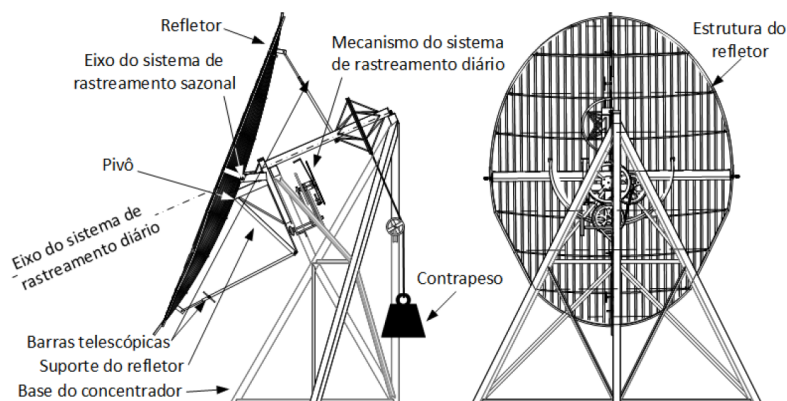


Figura 5.7: Vistas lateral e traseira do concentrador de Scheffler.

Fonte: Dib (2021).

O sistema de rastreamento sazonal foi composto por duas barras telescópicas posicionadas nas extremidades superior e inferior do maior eixo da moldura elíptica para permitir a alteração da curvatura da superfície refletora. O refletor foi fixado em cinco pontos, dos quais dois se encon-

travam nos suportes das barras telescópicas, dois sobre o eixo de rastreamento sazonal e um no parafuso central (ou pivô). O pivô tem a função de tensionar a superfície durante o ajuste do perfil da parábola (DIB, 2021).

O eixo diário foi instalado sobre o suporte do concentrador com a inclinação equivalente à latitude local de $23,55^\circ$. O acionamento do sistema de rastreamento diário foi feito por meio de um mecanismo provido de um conjunto de engrenagens, correntes, contrapeso e uma catraca anexada a um pêndulo responsável pela regulação da velocidade angular (figura 5.8). A inclinação do eixo diário deve ser ajustada de acordo com o horário solar no início da utilização do concentrador, e a força do contrapeso transmitida pelo sistema garante que o refletor acompanhe o Sol a uma velocidade angular de $15^\circ/\text{hora}$ (DIB, 2021).

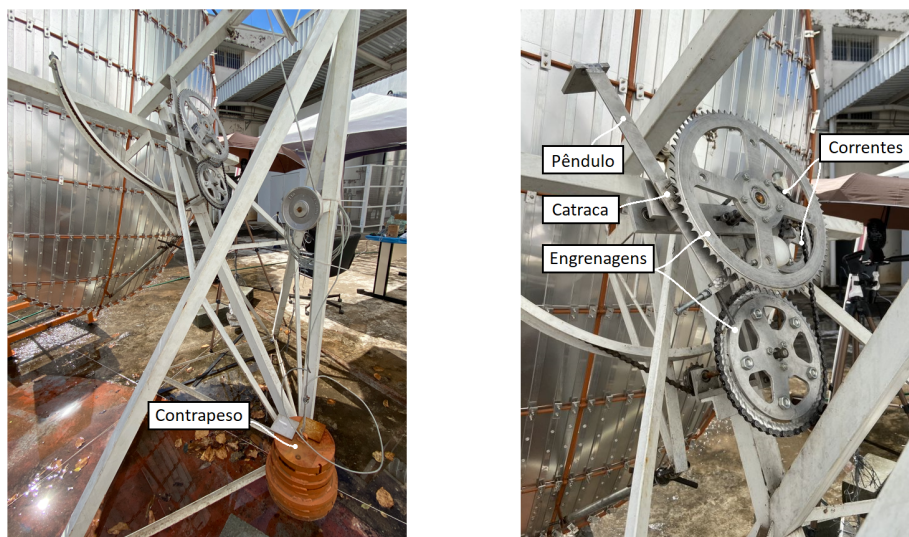


Figura 5.8: Mecanismo do sistema de rastreamento diário.

5.2.2 Alvo lambertiano

O alvo lambertiano foi fabricado em aço carbono com dimensões de 1,0 m x 0,6 m e jateamento com granalha de aço para a obtenção da rugosidade, seguido de aspensão térmica de alumina (Al_2O_3). A incerteza devida à luminosidade (δ_{alu}) pode ser verificada pelo cálculo do desvio padrão dos valores dos pixels de uma fotografia da placa convertida em escala de cinza no MATLAB. Dib (2021) realizou um teste de luminância na placa, em que a intensidade de luminosidade da superfície foi medida por um luminômetro em diferentes ângulos de incidência. O instrumento foi um Konica Minolta de modelo LS-110. Verificou-se uma média de luminância de 2.083 cd/m^2 e um desvio padrão de $75,78 \text{ cd/m}^2$ (3,6%) no intervalo de -40° a 40° , dentro do qual a câmera foi posicionada nas experimentações.

5.2.3 Câmera digital

A captura das imagens do foco foi feita com uma câmera CANON Rebel T6i composta por um sensor CMOS de resolução de 6000 x 4000 pixels e profundidade de pixel de 24 bits (figura 5.9). A lente utilizada continha um comprimento focal variável de 18 mm a 55 mm e foi ajustada em 18 mm em todos os experimentos. Evitou-se a ocorrência de saturação dos pixels nas fotografias para preservar as informações recebidas pelo sensor. A saturação acontece quando o limite de armazenamento de carga é excedido, tendo por consequência de a carga excedente não ser armazenada.



Figura 5.9: Câmera digital, lente e filtros utilizados nos experimentos.

Utilizou-se três filtros de densidade neutra de 0,9 OD e um de densidade variável de 0,6 OD a 2,6 OD para reduzir a intensidade da luz que atingiu o sensor. As fotografias foram obtidas com a câmera em modo manual com diferentes tempos de exposição e regulagens mínimas do ISO e abertura do obturador iguais a 100 e f/4, respectivamente. Após o processamento das imagens, selecionou-se as fotografias que mais se aproximaram do limite da exposição para extrair as informações do foco.

Câmeras com o sensor CMOS pode apresentar ruídos de corrente escura que resultam no aumento dos valores de alguns pixels da fotografia. A incerteza do ruído (δ_{scc}) foi considerada como o desvio padrão dos valores dos pixels de fotografias tiradas com a lente fechada. O seu efeito pode ser observado no aparecimento de pontos claros na fotografia (DIB, 2021).

5.3 Pireliômetro

A calibração dos resultados foi baseada nos dados de DNI aferidos por um pireliômetro instalado no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP), situado nas proximidades do local do experimento. O equipamento utilizado foi um Eppley do modelo PIR com incerteza (δ_{pir}) inferior a 1%. Durante o período de realização deste trabalho, as medições do IAG-USP foram interrompidas para a manutenção da estrutura e dos sensores do pireliômetro. Diante disso, optou-se por considerar os valores de DNI registrados entre os anos de 2013 e 2021 em dias com predominância de céu aberto nas respectivas datas dos experimentos. O pireliômetro verificou a irradiação a cada cinco minutos. O processo de calibração considerou o valor médio de irradiação do intervalo de uma hora em torno do meio-dia solar para a estimativa do fluxo de energia incidente.

5.4 Procedimento experimental

Os ajustes do concentrador foram realizados conforme o procedimento descrito nesta seção. Utilizou-se um clinômetro digital e óculos de proteção para soldagem permitindo a observação do foco sem causar danos à visão. O ajuste do foco foi feito de modo manual e com o auxílio do MATLAB com o objetivo de garantir resultados mais precisos. O procedimento foi iniciado ao menos duas horas antes do meio-dia solar para que o foco estivesse ajustado no momento de fotografá-lo.

A primeira etapa foi feita com a superfície espelhada coberta e sem a observação do foco e consistiu na regulagem do concentrador conforme os ângulos teóricos. Atrás do refletor há uma barra que representa o eixo de rastreamento sazonal indicada na figura 5.7. Ajusta-se o refletor conforme a hora solar ao igualar a sua inclinação com o azimute do sol (equação 2.4). Contudo, nesse momento, fixou-se o eixo sazonal na posição do meio-dia solar com um clinômetro digital ($\gamma_s = 0^\circ$).

Em sequência, colocou-se o mesmo clinômetro na moldura elíptica próximo ao ponto de fixação do eixo sazonal para igualar a inclinação do paraboloide com o valor teórico de α_n (equação 2.5) por meio das pinças telescópicas. Seguiu-se para a regulagem do eixo sazonal conforme o horário solar sem fixá-lo para que o relógio mecânico desse continuidade ao rastreamento diário do Sol. Descobriu-se o refletor para que o foco se projetasse no alvo lambertiano.

Com a superfície espelhada livre, fotografias do alvo foram tiradas com os ajustes da câmera apresentados na seção 5.2.3 e diferentes tempos de exposição. Selecionou-se uma fotografia sem saturação para observar no MATLAB se a distribuição dos valores dos pixels convergiu para um único pico. Caso isso fosse observado, aguardou-se o horário do meio-dia solar para registrar novas fotografias.

Caso houvesse a presença de mais de um pico, a radiação refletida não convergiria para um único foco. Neste cenário, foi necessário realizar um ajuste fino da curvatura do paraboloide por meio das pinças telescópicas de maneira visual. As pinças foram reguladas até que se observou um foco mais concentrado para ser fotografado e avaliado no MATLAB. Realizou-se o ajuste fino até obter uma distribuição mais convergente. A superfície do paraboloide resultante foi mantida para o registro das fotografias durante o meio-dia solar. Esse processo foi ilustrado no fluxograma da figura 5.10.

5.5 Incertezas de medições

Os experimentos e o processamento dos dados deste trabalho necessitam de alinhamentos e ajustes minuciosos, os quais elevam a propagação de incertezas de naturezas diversas. Nesta seção foi abordada a metodologia de estimativa das incertezas utilizada para avaliar o grau de flutuação dos resultados obtidos. A origem das incertezas observadas na estimativa das dimensões e distribuição de energia do foco está no processo de posicionamento e ajustes dos componentes da bancada e na coleta e tratamento dos dados. Este trabalho incorporou de Dib (2021) os principais equipamentos e o procedimento experimental, de modo que as incertezas foram estimadas de maneira semelhante. A tabela 4 mostra as incertezas dos instrumentos utilizados.

Tabela 4: Incertezas dos instrumentos de medição.

Instrumento	Incerteza	Unidade	Condição
Clinômetro	$\pm 0,15$	°	-
Pireliômetro	1%	-	-
Trena a laser	$\pm 1,5$	mm	-
Trena de fita	$\pm 0,6$	mm	$L \leq 1 \text{ m}$
Trena de fita	$\pm (0,6 + L/500)$	mm	$L > 1 \text{ m}$

Ainda que exista um padrão de ajuste, a disposição do concentrador, alvo lambertiano e câmera varia ligeiramente entre os experimentos, devido a necessidade posicionar a câmera e o alvo antes de cada medição. Apenas a mesa do alvo e o concentrador não são removidos após os experi-

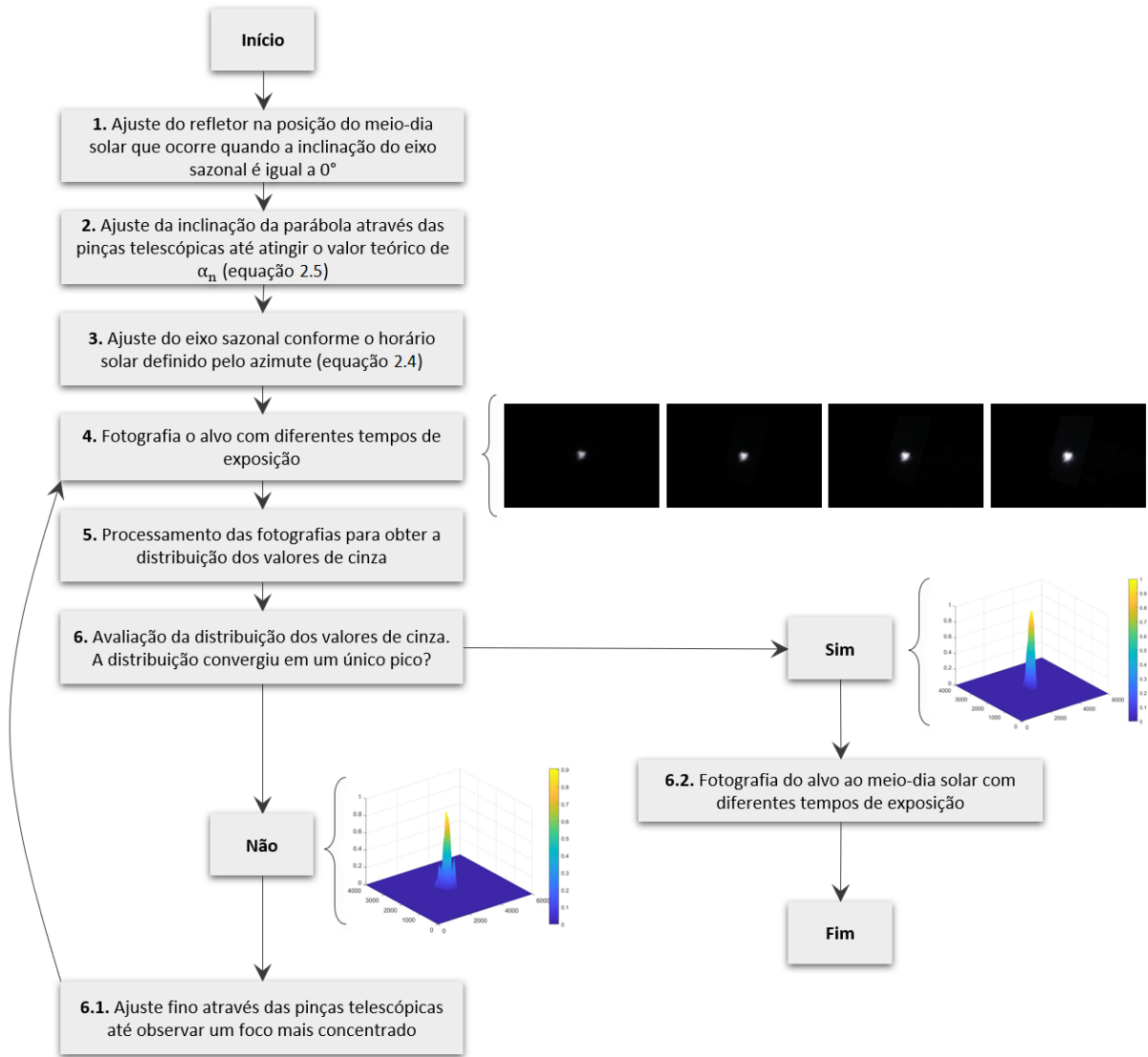


Figura 5.10: Procedimento experimental.

mentos e permanecem no mesmo local de instalação. Deste modo, as incertezas relacionadas ao posicionamento relativo desses componentes que interferem nas dimensões da imagem foram calculadas para cada experimento de modo individual. As equações 5.1 e 5.2 se referem às incertezas nos eixos y e z da imagem determinadas a partir das variações decorrentes do posicionamento da linha de referência Norte-Sul (δ_{NS}), alinhamento do concentrador (δ_{aco}) e da mesa do alvo nesta direção (δ_{aal}), posicionamento do alvo em relação ao centro do refletor (δ_{rad}) e posicionamento da câmera (δ_{cac}).

$$\delta_{aca,y} = \sqrt{\delta_{NS}^2 + \delta_{aco}^2 + \delta_{aal,y}^2 + \delta_{rad}^2 + \delta_{cac}^2} \quad (5.1)$$

$$\delta_{aca,z} = \sqrt{\delta_{NS}^2 + \delta_{aco}^2 + \delta_{aal,z}^2 + \delta_{rad}^2 + \delta_{cac}^2} \quad (5.2)$$

As incertezas relacionadas ao posicionamento dos componentes foram verificadas para cada data do experimento conforme a sua propagação na projeção da imagem no plano focal por uma análise geométrica. A linha Norte-Sul utilizada como referência para o posicionamento do concentrador e da mesa do alvo foi traçada a partir de marcações semanais do sombreamento de uma haste a 90° ajustada com um clinômetro realizadas ao meio-dia solar. O direcionamento do concentrador para o Norte foi feito ao posicionar a barra central de sua base em paralelo à linha Norte-Sul com o uso de uma trena.

A mesa do alvo lambertiano possui um apoio reclinável que comporta o alvo e uma base retangular, sendo dois de seus lados paralelos e outros dois perpendiculares à base do alvo. A mesa passou por dois ajustes. O primeiro foi feito para que os lados paralelos à base do alvo ficassem perpendiculares à linha de referência Norte-Sul. Para garanti-lo, os pontos centrais dos lados perpendiculares a essa direção foram determinados com uma trena de fita, e um prumo de centro foi fixado nas marcações. Em seguida, a base foi posicionada até que as pontas dos prumos se situassem sobre a linha de referência.

O apoio reclinável foi ajustado com um clinômetro para garantir que o plano do alvo se encontrasse perpendicular ao eixo de rastreamento diário. Os ajustes da mesa do alvo interferem nas dimensões y e z da imagem conforme as equações 5.3 e 5.4, em que φ é o ângulo formado entre o feixe central do cone de reflexão e o eixo de rastreamento diário. Os ângulos 0,15° e 0,25° correspondem às máximas incertezas devidas à inclinação do apoio e ao deslocamento da base em relação à direção Norte-Sul, respectivamente.

$$\delta_{aal,y} = w_y \left[\frac{\sin(\varphi - \theta_c - \theta_s)}{\sin(0,15^\circ + \varphi - \theta_c - \theta_s)} - \frac{\sin(\varphi - \theta_c - \theta_s)}{\sin(\varphi - \theta_c - \theta_s - 0,15^\circ)} \right] \quad (5.3)$$

$$\delta_{aal,z} = w_z \left[\frac{\sin(\varphi - \theta_c - \theta_s)}{\sin(0,25^\circ + \varphi - \theta_c - \theta_s)} - \frac{\sin(\varphi - \theta_c - \theta_s)}{\sin(\varphi - \theta_c - \theta_s - 0,25^\circ)} \right] \quad (5.4)$$

A distância entre o alvo lambertiano e o refletor foi medida com uma trena a laser. Considerou-se que o centro do refletor correspondeu a uma estrutura de fixação central com largura de 5 mm inclinado à 45° em relação ao eixo diário. Esse ajuste interfere nas dimensões da imagem conforme a incerteza mensurada pela equação 5.5.

$$\delta_{rad} = (1,5 + 5 \cos 45^\circ) \frac{\tan \varphi}{2} \quad (5.5)$$

Em todos os experimentos, mediu-se com uma trena de fita as distâncias \overline{PF} , \overline{CP} , \overline{CF} detalhadas na figura 5.6 e a altura da câmera ao solo. Com base nesses valores, calculou-se a incerteza do posicionamento da câmera conforme a equação 5.6.

$$\delta_{cac} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{\overline{PF}}}{\overline{PF}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\overline{CP}}}{\overline{CP}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\overline{CF}}}{\overline{CF}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{h_c}}{h_c}\right)^2} \quad (5.6)$$

Os ajustes do rastreamento do concentrador interferem nas dimensões da imagem por provocar a sua rotação no plano focal. O rastreo funciona com um mecanismo de contrapeso, cujo período foi ajustado para que se tornasse o mais próximo da variação angular horária do sol. Para mensurar a variação desse ajuste, utilizou-se os valores medidos pelo clinômetro posicionado na barra do eixo de rastreamento sazonal antes e depois da captação das fotografias. As incertezas do rastreamento diário foram verificadas com a diferença entre os ângulos do clinômetro e horário solar, incluindo o desvio do equipamento. O ajuste sazonal foi feito com a regulação manual da distribuição do foco, até que este permanecesse o mais concentrado possível. As incertezas deste ajuste foi estimada pelo ângulo θ_c ao relacionar as dimensões focais teóricas com as obtidas nos experimentos.

As variações do fluxo de energia no pixel das fotografias foram estimadas pelo tratamento das imagens tiradas (equação 5.7). Foram consideradas as incertezas do pireliômetro, da estimativa da área de abertura efetiva do concentrador (δ_ζ), da luminância (δ_{all}) e luminosidade do alvo lambertiano (δ_{alu}) e dos ruídos de corrente escura da câmera (δ_{cce}). As variáveis \bar{I}_{all} , \bar{I}_{alu} e \bar{V}_{cinza} são os valores médios da luminância, luminosidade e do valor de cinza.

$$\delta_g = \sqrt{\left(\frac{\delta_{pir}}{DNI}\right)^2 + \left(\frac{\delta_\zeta}{A_{ref}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{all}}{\bar{I}_{all}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{alu}}{\bar{I}_{alu}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{cce}}{\bar{V}_{cinza}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{cvi}}{\bar{V}_{vig}}\right)^2} \quad (5.7)$$

Conforme apresentado anteriormente, a área entre os espelhos correspondeu a $0,013 \pm 0,001$ m², e os testes de luminância do alvo lambertiano indicou uma luminância média de 2.083 cd/m² e um desvio padrão de 3,6% dentro do intervalo de -40° a 40°. A incerteza da luminosidade do alvo foi aferida com o desvio padrão dos valores de pixel da fotografia da placa lambertiana alvo sem a incidência de energia solar concentrada. Com os filtros e lente utilizados nos experimentos, foram tiradas fotografias da placa para avaliar o efeito da vinheta na superfície lambertiana de

modo semelhante. Ambas análises foram feitas com fotografias tiradas com a câmera e o alvo posicionados na mesma configuração das imagens do foco em cada experimento. A incerteza dos ruídos foi aferida pelo desvio padrão dos pixels de uma fotografia tirada com a lente fechada.

6 RESULTADOS

Este capítulo foi dividido em duas seções e tem por objetivo abordar as etapas de análise do desempenho do concentrador em relação ao seu potencial de concentração de energia ao longo do ano. Analisou-se como ocorreram as variações teóricas da abertura do concentrador e das dimensões da imagem conforme a sazonalidade e os ângulos ópticos de desvio na seção 6.1. Na seção 6.2, caracterizou-se a distribuição dos feixes na zona focal a partir dos dados experimentais, detalhou-se o procedimento de processamento dos dados para o cálculo do fator de interceptação e do fluxo de energia nas diferentes regiões do foco, calibrou-se o sistema e comparou-se os resultados obtidos nos doze experimentos.

6.1 Área de abertura do concentrador e dimensões da imagem

Os valores teóricos da área de abertura do concentrador e dimensões da imagem foram verificados por simulação no EES para as datas dos experimentos: 21 (21/01/2022), 45 (14/02/2022), 82 (23/03/2022), 110 (20/04/2022), 144 (24/05/2022), 174 (23/06/2022), 203 (22/07/2022), 236 (24/08/2022), 270 (27/09/2021), 296 (23/10/2021), 327 (23/11/2021), 354 (20/12/2021). Os resultados foram obtidos com base nas equações geométricas do concentrador e da imagem formada apresentadas nos capítulos 2 e 4. As dimensões da imagem são influenciadas pelo ângulo de abertura do cone óptico e pela sazonalidade que modifica o perfil da superfície refletora. Deste modo, a análise se baseou em observar o comportamento das curvas de acordo com esses dois parâmetros.

Os índices dos gráficos apresentados a seguir correspondem às datas dos experimentos, e as linhas que os conectam são tangentes entre si baseadas em seus respectivos valores. A figura 6.1 mostra que a área de abertura teórica possuiu um comportamento cíclico com simetria em datas próximas aos solstícios ($n = 172$ e 355). A oscilação da curva ocorreu em torno do eixo $y = 2 \text{ m}^2$, cuja área de abertura correspondeu à área de projeto do concentrador nos equinócios ($n = 79$ e 265). O SS estudado foi posicionado no hemisfério sul, portanto, a maior área de captação de radiação ocorreu no inverno e a menor no verão.

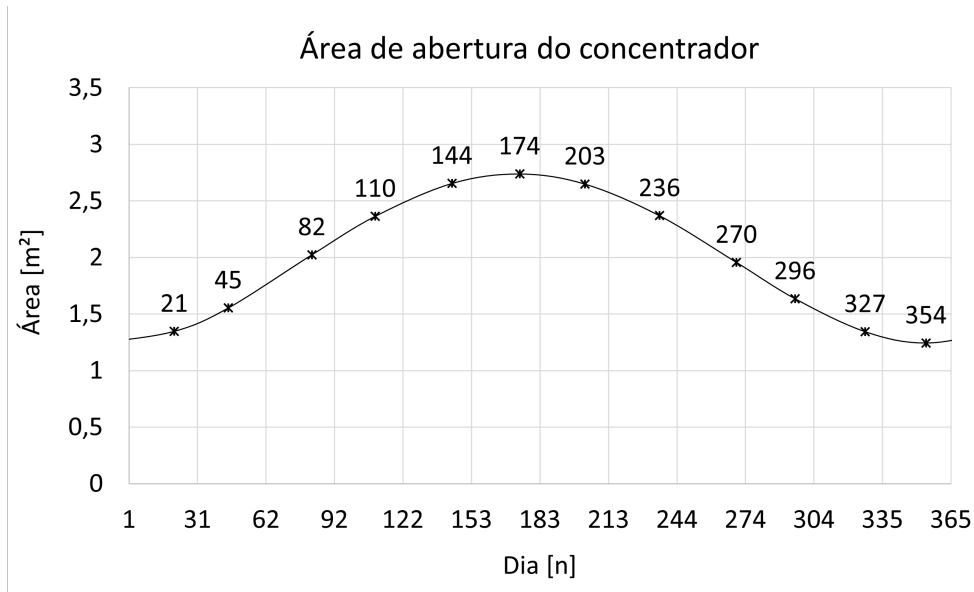


Figura 6.1: Variação da área de abertura teórica de um SS de 2 m^2 de abertura no equinócio em relação ao dia do ano ($1 \leq n \leq 365$).

As dimensões da imagem foram definidas em função da sazonalidade e do ângulo de abertura do cone óptico de reflexão (equação 4.2). As aberturas dos cones de reflexão relacionadas ao disco solar e aos espelhos foram consideradas iguais a $4,65 \text{ mrad}$ e $12,5 \text{ mrad}$, respectivamente. Desta forma, a variação do ângulo de abertura decorreu dos desvios gerados pela estrutura do concentrador. Observou-se na figura 6.2 que o aumento de θ_b elevou as dimensões dos eixos y e z do núcleo ($W_{y,min}$ e $W_{z,min}$) e da fronteira ($W_{y,max}$ e $W_{z,max}$). A curva da área de abertura do concentrador apresentou um formato semelhante ao das dimensões do núcleo da imagem, as quais são simétricas nos solstícios e seguem a mesma tendência de ser maior no solstício de junho e menor no solstício de dezembro.

O eixo $W_{z,max}$ agiu de modo inverso em relação as curvas do núcleo em uma faixa de variação reduzida. O seu comprimento é maior em dezembro e menor em junho. Uma oscilação distinta foi observada em $W_{y,max}$, a qual intercalou em momentos de decréscimo e crescimento com os marcos nos meses de abril, junho, agosto e dezembro. As alterações na imagem ao longo do ano decorreram da mudança no formato da superfície refletora. As dimensões de $W_{y,min}$ apresentaram a maior faixa de variação com o passar dos meses para um mesmo ângulo de abertura, seguido de $W_{y,max}$, $W_{z,max}$ e $W_{z,min}$ (figura 6.4).

As dimensões da imagem seguiram uma tendência semelhante à observada na figura 4.4 extraída do trabalho de Dib (2021). Ao analisar a variação dos eixos conforme o ângulo de abertura do cone, verificou-se que o aumento de θ_b produziu uma imagem maior e elevou o intervalo de

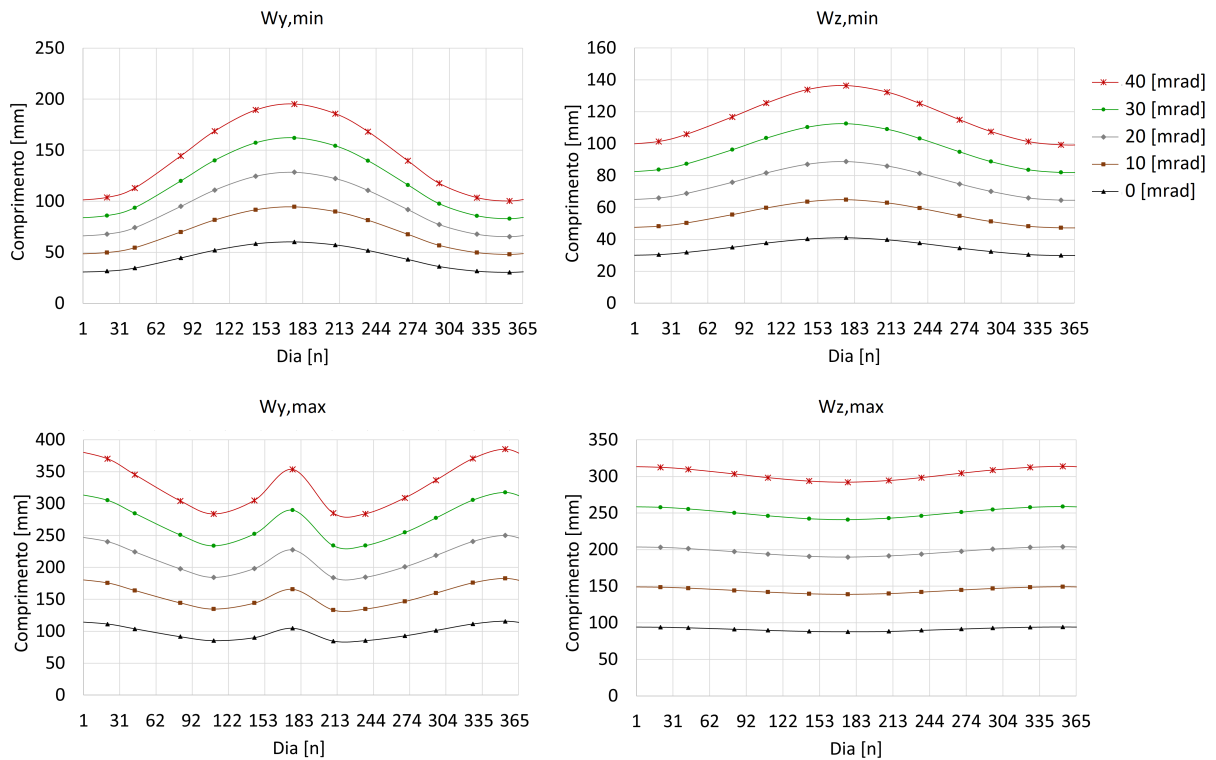


Figura 6.2: Variação das dimensões dos eixos de núcleo e fronteira da imagem ao longo do ano.

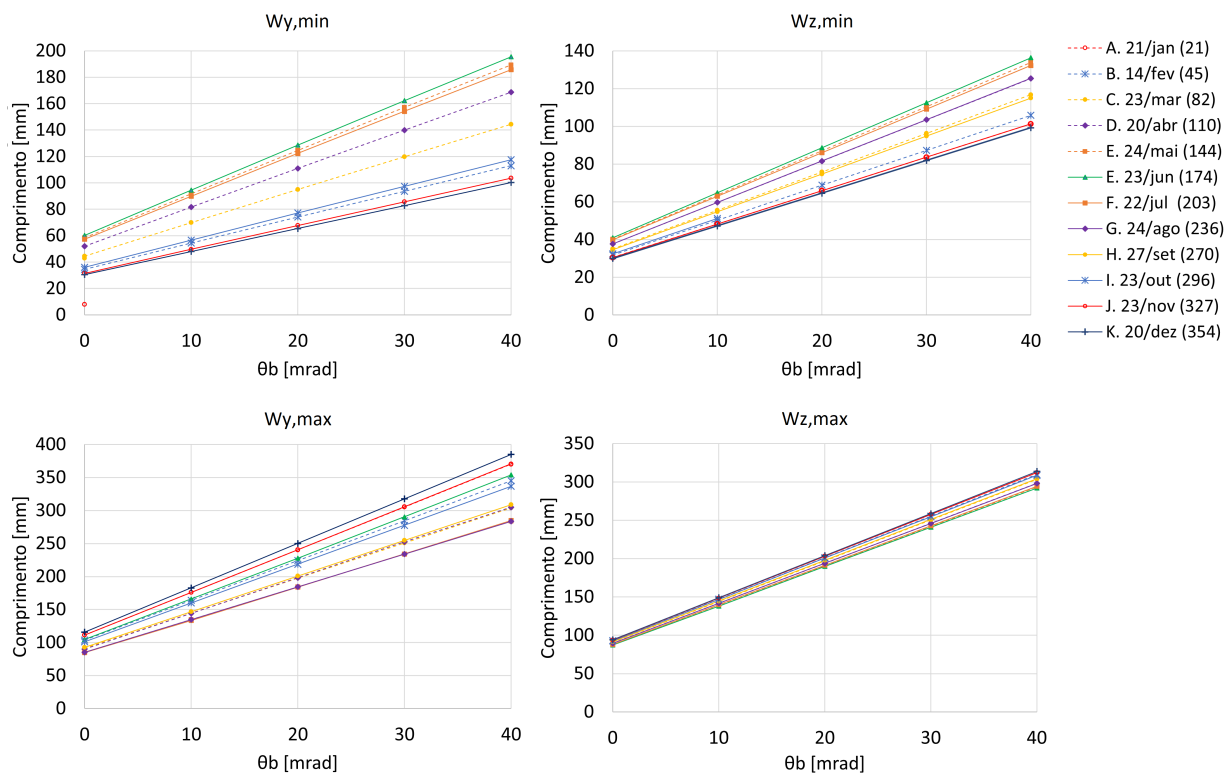


Figura 6.3: Variação das dimensões dos eixos de núcleo e fronteira da imagem conforme a abertura do cone de reflexão.

variação da imagem ao longo de um ano (figura 6.3). Quando se considera uma mesma quantidade de energia refletida pelo concentrador, uma zona focal menor apresenta uma distribuição dos feixes

mais concentrada e um pico mais acentuado do que uma zona focal maior.

As figuras 6.4 e 6.5 descrevem as áreas teóricas do núcleo e fronteira da imagem com geometria elíptica. A oscilação da curva de $W_{y,max}$ induziu a um formato semelhante no gráfico da área da fronteira, cujo maior valor ocorreu em dezembro quando o núcleo possuiu a sua menor área. O momento de ocorrência da maior área do núcleo coincidiu com o do segundo pico na curva da fronteira em junho.

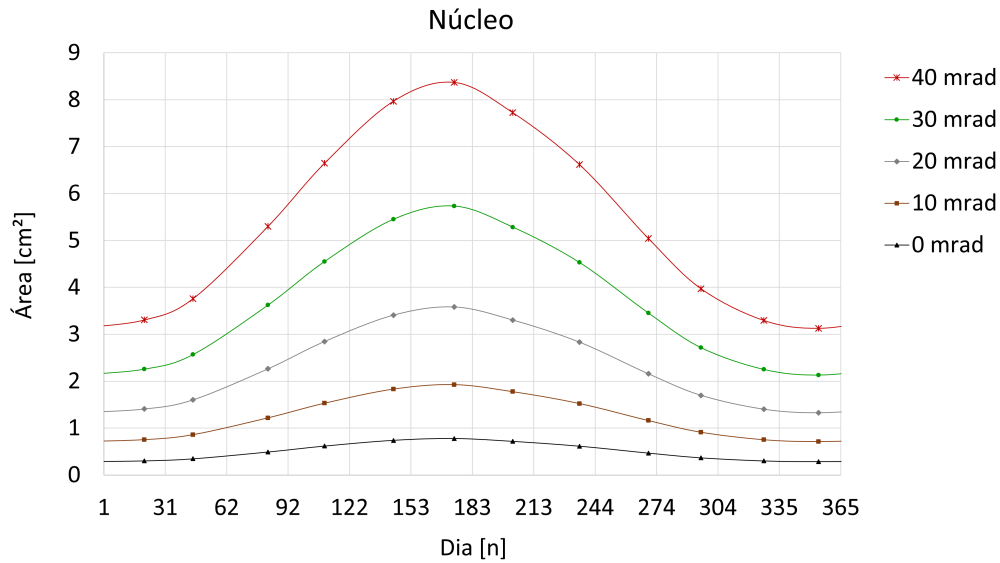


Figura 6.4: Variação da área do núcleo da imagem.

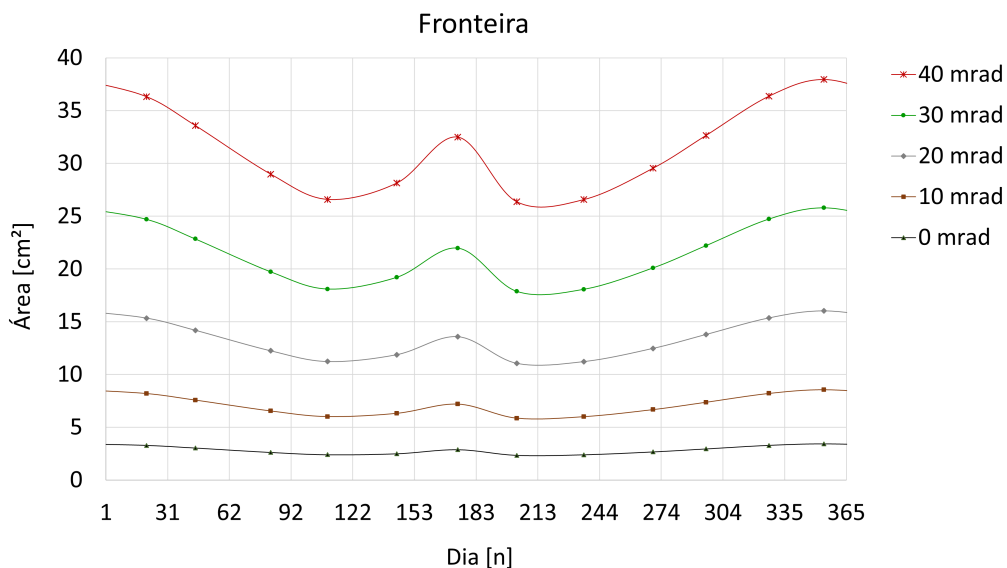


Figura 6.5: Variação da área da fronteira da imagem.

A figura 6.6 mostra a proporção da área do núcleo em relação à da fronteira. A curva seguiu uma combinação dos comportamentos das figuras 6.4 e 6.5. A proporção do núcleo apresentou o

menor valor em dezembro e dois picos em maio e julho. Em junho, a queda observada pode ser justificada pelo segundo pico na curva da área da fronteira, apesar de corresponder ao mês com a maior área do núcleo.

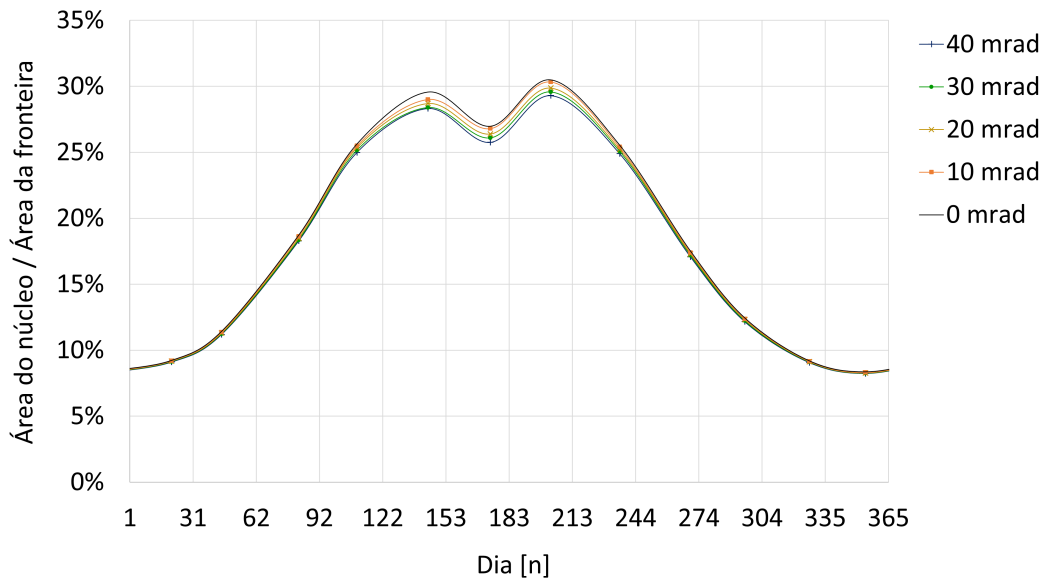


Figura 6.6: Proporção entre as áreas do núcleo e da fronteira da imagem.

6.2 Potência incidente e fluxo de energia na imagem

A distribuição da energia na zona focal da imagem foi verificada por meio dos experimentos e do posterior processamento dos dados realizado no MATLAB. O primeiro experimento foi realizado em setembro de 2021, e o último em agosto de 2022. Todos os experimentos seguiram o procedimento descrito na seção 5.4. Os valores dos pixels das fotografias em escala de cinza possuem uma relação linear com o fluxo de energia local como foi apresentado no capítulo 4.2. No entanto, a forma como os níveis de intensidades de cinza se dispõem na fotografia permite verificar a geometria do foco e em quais regiões há uma maior concentração de feixes. Essas características são importantes para o cálculo do fator de interceptação e a determinação das aberturas dos receptores. Destaca-se que o fator de interceptação pode ser aferido apenas com o somatório dos valores dos pixels e sem a calibração do sistema.

Os gráficos da distribuição do fluxo de energia na zona focal de cada experimento foram dispostos na figura 6.7. Observou-se um pico elevado ao centro do foco e uma queda acentuada ao se afastar desta região. Nas curvas de $n = 144$, 174 e 203, houve ruídos na região de baixa intensidade, enquanto nas demais essa região apresentou um contorno mais uniforme. No trabalho de Dib (2021), irregularidades na fronteira decorrentes das deformações da estrutura do concentrador

foram identificadas. Tais alterações ocorrem conforme os materiais, perfis geométricos, pontos de soldagem e usinagem utilizados no processo construtivo. As características únicas de cada concentrador podem propagar irregularidades de maneira individual entre diferentes concentradores de Scheffler.

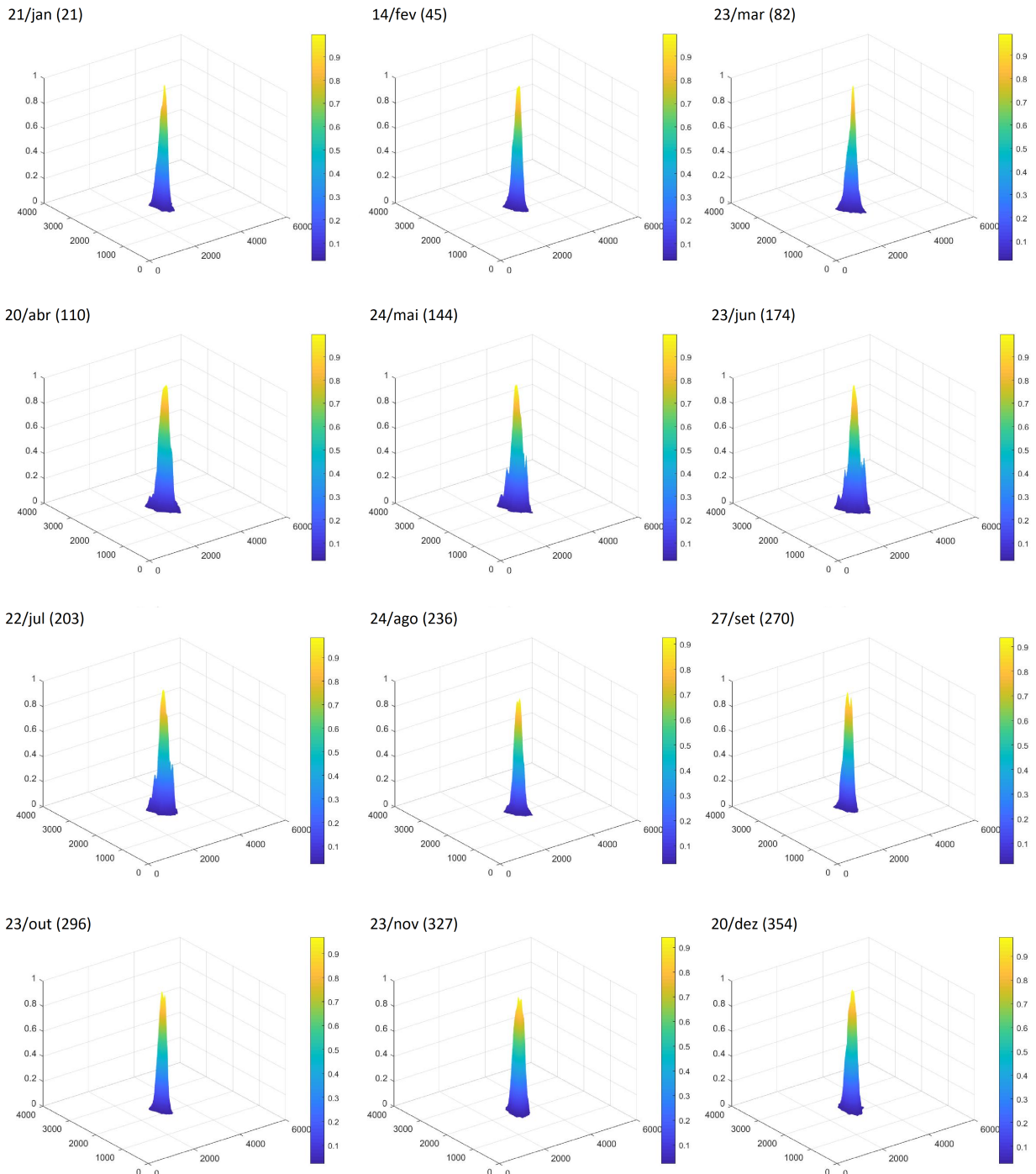


Figura 6.7: Distribuição dos valores dos pixels no foco projetado no alvo lambertiano.

A análise do fator de interceptação oferece informações acerca do percentual do fluxo de energia solar concentrada que intercepta a abertura de um receptor. Como neste trabalho não se utilizou um receptor, a sua abertura foi representada por uma área circular do plano focal. Levou-se

em consideração a natureza da distribuição do fluxo, a facilidade construtiva e o menor custo de fabricação de uma abertura circular ao invés de elíptica. Este estudo permite observar como a energia se distribui com o aumento do raio em cada dia do experimento. É possível obter uma maior compreensão de como o fluxo se modifica com a sazonalidade quando se compara regiões equivalentes. O procedimento realizado foi uma adaptação de Dib (2021) e se encontra descrito a seguir. O código utilizado no MATLAB foi disponibilizado no Apêndice A.

A primeira etapa consistiu em inserir os eixos F_y e F_z do plano focal na fotografia e a segunda em inserir circunferências com diferentes raios e o centro na origem e calcular o fator de interceptação. A origem do sistema de coordenadas correspondeu ao centroide da região de concentração da energia solar, a qual foi nomeada de zona focal. Considerou-se que toda a energia refletida pelo concentrador incide sobre ela.

As equações das retas foram baseadas nas arestas da placa lambertiana por serem paralelas ou perpendiculares aos eixos F_y e F_z . É importante mencionar que a perspectiva observada na fotografia do alvo é cônica. Portanto, tanto as arestas quanto os eixos não são visualizados como retas paralelas ou perpendiculares entre si, embora sejam na realidade. A inclinação da base de apoio da mesa do alvo foi ajustada até que o clinômetro indicou 0° para garantir que as arestas inferior e superior da placa se encontrassem na horizontal.

Para obter a origem, foi preciso isolar a zona focal do restante da fotografia. Além de ser utilizada para localizar o centroide, a zona focal contém os pixels que representam a irradiação total concentrada na placa utilizada no cálculo do fator de interceptação. A fotografia do alvo em RGB foi inserida no MATLAB e convertida em escala de cinza pelo comando *rgb2gray* como mostra a figura 6.8a. Em seguida, utilizou-se o comando *im2bw* com um fator adaptado para cada experimento com o objetivo de filtrar os pixels com um percentual de luminância mínimo entre 0 e 1 (figura 6.8b).

O resultado foi a conversão dos tons de cinza em uma matriz binária em que todos os pixels iguais ou acima do valor foram substituídos por 1 (em branco) e os demais por 0 (em preto). Este comando permitiu reduzir os ruídos e isolar apenas os pixels estimulados pela radiação concentrada. O fator utilizado dependeu da intensidade luminosa dos pixels que pode variar entre os experimentos por ser um resultado da irradiação no local e dos ajustes dos filtros de densidade neutra e da câmera.

Para garantir que houvesse apenas um elemento na imagem para a obtenção do centroide,

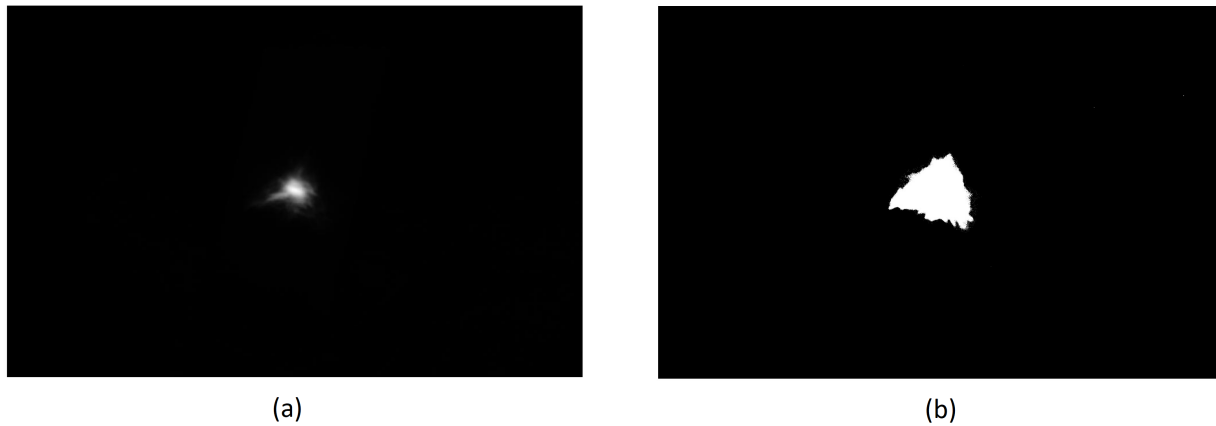


Figura 6.8: (a) Fotografia original em escala de cinza. (b) Fotografia após o comando *im2bw*.

escolheu-se um pixel no interior do componente principal e aplicou-se o comando *bwselect*. A matriz retornada correspondeu à zona focal, representada pela imagem binária com o único elemento que sobrepôs o pixel selecionado (figura 6.9). Com o comando *imfilter*, a fronteira da zona focal foi suavizada com a ferramenta *average* que calcula o valor médio de uma matriz de tamanho 16 x 16 ao redor do pixel. Em sequência, utilizou-se o comando *regionprops* para extrair as coordenadas do centroide da figura.



Figura 6.9: Zona focal obtida após o comando *bwselect*.

A obtenção dos parâmetros dos eixos do plano focal foi feita a partir das coordenadas dos vértices da placa e do centroide. A matriz da fotografia original em escala de cinza foi multiplicada por um fator de combinação linear igual a 30 com o comando *imlincomb*, o que tornou possível a visualização da placa lambertiana e a obtenção das coordenadas de seus vértices (figura 6.10).

As coordenadas dos vértices da placa e do centroide extraídas no MATLAB foram inseridas nas equações da reta escritas no EES para o cálculo dos parâmetros dos eixos. A perspectiva cônica possui dois pontos de fuga localizados no cruzamento de retas paralelas. Utilizou-se as retas que sobrepõem as arestas verticais e horizontais da placa. Os eixos F_y e F_z foram determinados



Figura 6.10: Fotografia após o comando *imlincomb*.

pelas retas que passam pelo centroide e um dos pontos de fuga. Os parâmetros calculados foram transferidos para o MATLAB, onde as retas foram plotadas nas fotografias. A figura 6.11 mostra os eixos F_y e F_z traçados sobre a matriz binária da zona focal.

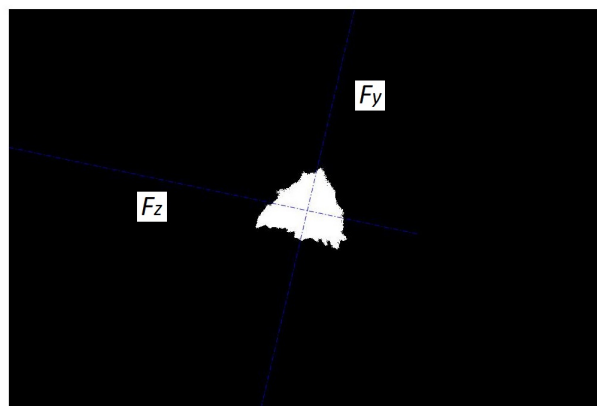


Figura 6.11: Eixos F_y e F_z sobre a matriz da zona focal.

O fator de interceptação pôde ser determinado sem a calibração do sistema, uma vez que o fluxo de energia é linear em relação ao valor de cinza. Assim, este fator pode ser aferido pela razão entre os somatórios dos valores dos pixels contidos em uma dada área e na zona focal, cuja irradiação incidente foi considerada como equivalente à irradiação refletida pelo concentrador. Para representar a área de abertura do receptor, circunferências de diferentes raios foram inseridas nas fotografias do alvo com o seu centro sobre a origem do sistema de coordenadas.

Foi preciso isolar a zona focal da fotografia original em escala de cinza para somar as intensidades dos pixels da região. Utilizou-se o comando *immultiply* para multiplicar a matriz binária da zona focal (figura 6.9) pela fotografia em escala de cinza (figura 6.8a). O resultado foi uma matriz em que dentro da zona focal a distribuição original permaneceu e fora dela os pixels se tornaram zero. O somatório dos pixels da matriz resultante representou o fluxo total da energia

solar concentrada.

A partir da matriz da zona focal isolada em escala de cinza, inseriu-se circunferências de diferentes raios com o centro sobre o centroide. A soma dos valores dos pixels no interior de cada circunferência representa o fluxo incidente na abertura do receptor no cálculo do fator de interceptação. A figura 6.12 mostra as curvas do fator de interceptação de cada experimento em função do diâmetro de abertura. Observou-se um comportamento crescente até que convergiu em um platô quando o fator de interceptação se aproximou de 1, ou seja, quando toda a energia solar concentrada incidiu sobre a abertura do receptor.

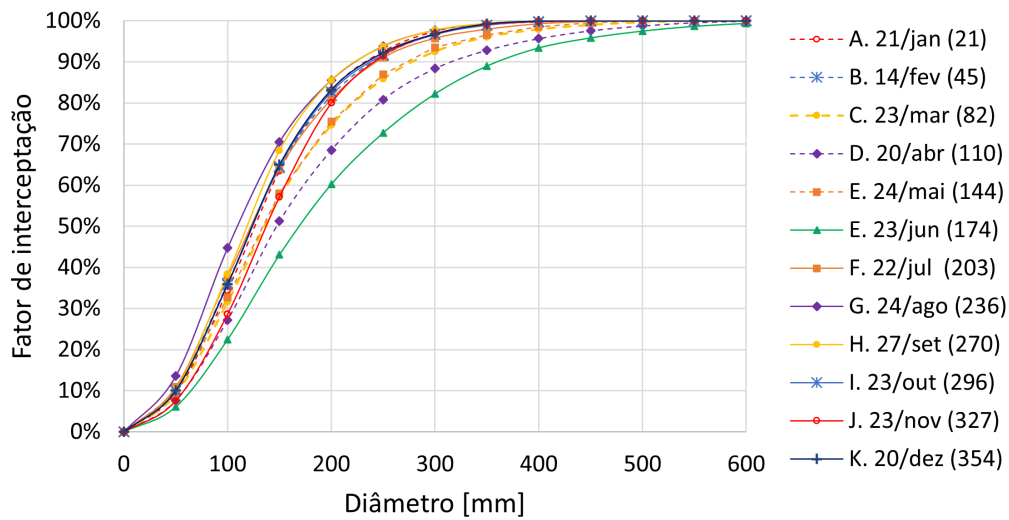


Figura 6.12: Fator de interceptação conforme a abertura circular de um receptor posicionada no plano focal para os diferentes meses do ano.

Os feixes de radiação que incidem na superfície espelhada de concentradores reais têm o seu ângulo de reflexão aumentado em decorrência de desvios provocados pelos espelhos e estrutura do concentrador, os quais são influenciados pelos elementos utilizados na construção, ajustes e sistema de rastreamento. As medidas dos semieixos teóricas foram associadas às aferidas nas imagens das doze experimentações, e obteve-se um θ_b anual de 38,3 mrad. Considerou-se que os desvios devido aos espelhos foi de 12,5 mrad e ao disco solar de 4,65 mrad, resultando em um total aproximado para o ângulo de desvio igual a 55,5 mrad.

Se considerar um mesmo fluxo de energia, a redução da área focal resulta em feixes mais concentrados e eleva o valor da intensidade no pico. De outro modo, o aumento da área do foco provoca a dispersão dos feixes e reduz a intensidade máxima atingida. A figura 6.13 mostra o comportamento do fator de interceptação com base nas dimensões teóricas da imagem nas respectivas datas dos experimentos apresentadas na tabela 5.

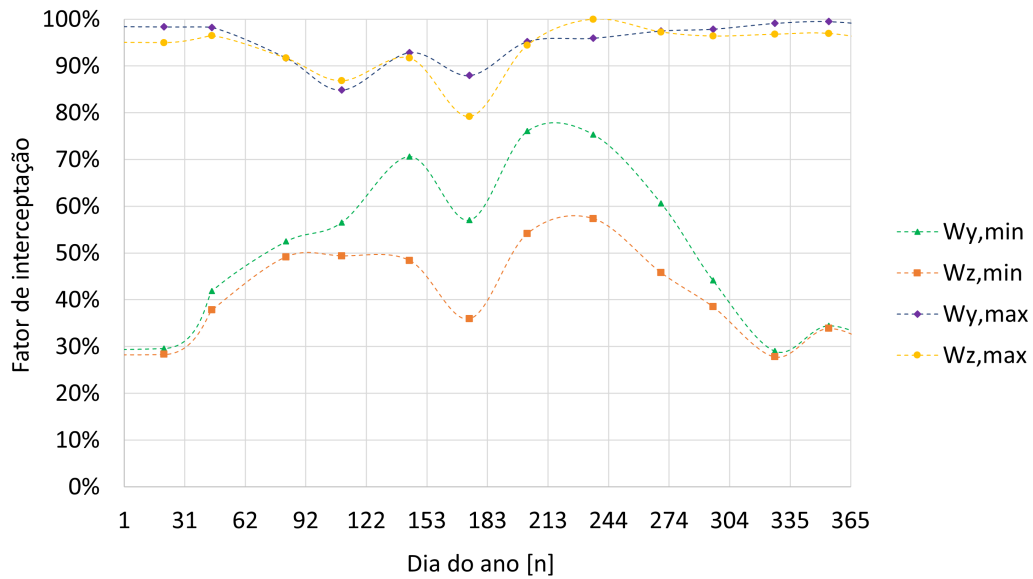


Figura 6.13: Curva anual do fator de interceptação na zona focal para um θ_b de 38,3 mrad.

Tabela 5: Dimensões da imagem para um θ_b igual a 38,3 mrad.

Dia [n]	$W_{y,min}$ [mm]	$W_{z,min}$ [mm]	$W_{y,max}$ [mm]	$W_{z,max}$ [mm]	A_{min} [cm ²]	A_{max} [cm ²]
21	101,1 ± 5,0	98,7 ± 5,0	360,4 ± 5,7	304,2 ± 5,5	3,1 ± 0,3	34,4 ± 1,2
45	110,1 ± 5,0	103,1 ± 5,0	336,6 ± 5,6	301,7 ± 5,5	3,6 ± 0,3	31,8 ± 1,1
82	140,7 ± 5,0	113,7 ± 4,9	296,1 ± 5,4	295,4 ± 5,4	5,0 ± 0,4	27,5 ± 1,0
110	164,4 ± 5,0	122,1 ± 5,0	276,2 ± 5,4	290,5 ± 5,4	6,3 ± 0,4	25,2 ± 1,0
144	184,6 ± 5,1	130,4 ± 5,0	297,1 ± 5,5	285,9 ± 5,4	7,6 ± 0,5	26,7 ± 1,0
174	190,4 ± 5,1	132,8 ± 5,0	344,5 ± 5,7	284,4 ± 5,4	7,9 ± 0,5	30,8 ± 1,1
203	181,1 ± 5,1	128,8 ± 5,0	277,4 ± 5,4	286,7 ± 5,4	7,3 ± 0,5	25,0 ± 1,0
236	164,7 ± 5,1	122,2 ± 5,0	276,0 ± 5,4	290,5 ± 5,4	6,3 ± 0,5	25,2 ± 1,0
270	136,0 ± 5,0	112,0 ± 4,9	300,8 ± 5,5	296,4 ± 5,4	4,8 ± 0,4	28,0 ± 1,0
296	114,5 ± 5,0	104,8 ± 5,0	327,8 ± 5,6	300,6 ± 5,5	3,8 ± 0,3	31,0 ± 1,1
327	100,9 ± 4,9	98,6 ± 4,9	360,9 ± 5,7	304,2 ± 5,5	3,1 ± 0,3	34,5 ± 1,2
354	97,7 ± 4,9	96,7 ± 4,9	375,0 ± 5,8	305,5 ± 5,5	3,0 ± 0,3	36,0 ± 1,2

Observou-se que existe um grau de semelhança entre a proporção das regiões do foco e o fator de interceptação no núcleo. O núcleo foi definido no capítulo 4 como a região em que todo o refletor contribui com o fluxo. É nele onde se encontra a maior quantidade de energia por unidade de área. A fronteira engloba todo o núcleo, e obteve-se pelo menos 79% da energia solar concentrada considerando a sua área teórica nos doze experimentos. Logo, as variações da área do núcleo em relação à da fronteira afetam a quantidade de energia que intercepta a região. Quanto maior é essa proporção, maiores são o fator de interceptação e a energia solar incidente no núcleo.

Em geral, houve maiores percentuais no fator de interceptação do núcleo em meses do ano em que as áreas de abertura do concentrador foram maiores para um mesmo θ_b . No caso da figura 6.12, ao fixar a abertura do receptor, as curvas com menores percentuais ocorreram nos experimentos de

$n = 110$ e 144 , cujas aberturas do concentrador estiveram entre as mais elevadas. Deste modo, a calibração do sistema é importante para verificar o fluxo de energia incidente presente no foco em cada experimento.

Destaca-se que o fator de interceptação não aborda processos como os de transferência de calor. Busca-se maximizar a irradiação captada e minimizar a rerradiação perdida em projetos de abertura de receptores do tipo cavidade. O aumento da abertura contribui tanto para a elevação da irradiação captada quanto da perdida. Deste modo, ambos os efeitos devem ser ponderados no desenvolvimento de receptores mais eficientes (ABUSEADA; OZALP, 2020).

Para obter a potência incidente no foco do concentrador, converteu-se a escala de cinza das fotografias do alvo lambertiano a partir das aferições de irradiação solar realizadas por um pireliômetro instalado no IAG-USP. Foram utilizados os dados históricos de 2013 a 2021 coletados nas datas dos experimentos. Uma vez que o concentrador opera em condições de céu aberto, utilizou-se apenas as curvas, cujas condições próximas ao horário de realização dos experimentos foram compatíveis às de operação.

A partir da irradiação direta medida pelo pireliômetro e das equações contidas na seção 4.2, foi possível selecionar apenas as curvas que apresentaram condições de céu aberto próximo ao meio-dia solar. A tabela 6 contém os valor médio da irradiação direta no intervalo de uma hora com início à meia hora antes do meio-dia solar. Esse valores foram utilizados para calibrar a escala de cinza das fotografias e estimar a potência que incide na zona focal.

Tabela 6: Irradiação solar direta próximo ao meio-dia solar.

Data	Dia [n]	$I_{b,n}$ [W/m^2]
21/01/2022	21	940
14/02/2022	45	818
23/03/2022	82	766
20/04/2022	110	763
24/05/2022	144	756
23/06/2021	174	822
22/07/2021	203	792
24/08/2021	236	852
27/09/2021	270	840
23/10/2021	296	818
23/11/2021	327	793
20/12/2021	354	928

A partir dos valores de DNI e das equações de 4.20 a 4.23, obteve-se a potência incidente na zona focal e nas regiões do foco com raios equivalentes aos eixos teóricos, o fator de interceptação

e o fluxo máximo atingido. Considerou-se que a razão de concentração de energia (C_e) corresponde à razão entre o fluxo máximo de energia no pixel e o DNI (DIB, 2021). Assim, os resultados de cada data dos experimentos se encontram na tabela 7.

A figura 6.14 mostra a curva da potência incidente na zona focal com diâmetros equivalentes aos eixos da imagem. A irradiação solar aferida em horário próximo ao do experimento e em condição de céu limpo oscilou ao longo do ano. Contudo, o comportamento da potência incidente no plano focal seguiu ao da área de abertura do SS estudado por regular a captação de energia, sendo maior no inverno (figura 6.15). Uma parcela significativa da energia solar concentrada incide na fronteira. Assim, a potência desta região tende a se igualar à refletida pelo concentrador quanto maior for o fator de interceptação.

Dia [n]	A_{ap} [m ²]	I_{inc} [W]	$G_{y,min}$ [W]	$\gamma_{y,min}$	$G_{z,min}$ [W]	$\gamma_{z,min}$	$G_{y,max}$ [W]	$\gamma_{y,max}$	$G_{z,max}$ [W]	$\gamma_{z,max}$	$g_{f,max}$ [kW/m ²]	C_e
21	1,35	1.196,9 ± 12,0	354,3 ± 18,6	30%	339,1 ± 17,8	28%	1.177,3 ± 62,0	98%	1.136,8 ± 59,8	95%	263,6 ± 13,9	280
45	1,55	1.201,6 ± 12,0	503,5 ± 26,3	42%	454,8 ± 23,7	38%	1.180,6 ± 61,6	98%	1.158,9 ± 60,4	96%	281,6 ± 14,7	344
82	2,02	1.465,5 ± 14,7	768,8 ± 40,2	52%	720,5 ± 37,7	49%	1.344,4 ± 70,3	92%	1.343,4 ± 70,2	92%	360,9 ± 18,9	471
110	2,36	1.705,0 ± 17,1	964,0 ± 50,7	57%	842,1 ± 44,3	49%	1.446,6 ± 76,1	85%	1.480,3 ± 77,9	87%	243,2 ± 12,8	319
144	2,66	1.897,3 ± 19,0	1.340,2 ± 71,1	71%	918,3 ± 48,7	48%	1.761,8 ± 93,4	93%	1.739,3 ± 92,2	92%	269,0 ± 14,3	356
174	2,74	2.128,2 ± 21,3	1.213,5 ± 63,4	57%	765,2 ± 40,0	36%	1.871,8 ± 97,8	88%	1.685,5 ± 88,1	79%	274,9 ± 14,4	334
203	2,65	1.983,1 ± 19,8	1.508,5 ± 80,7	76%	1.074,2 ± 57,4	54%	1.888,1 ± 101,0	95%	1.873,0 ± 100,2	94%	306,1 ± 16,4	386
236	2,37	1.907,9 ± 19,1	1.437,6 ± 73,7	75%	1.094,3 ± 56,1	57%	1.830,3 ± 93,9	96%	1.907,9 ± 97,9	100%	378,6 ± 19,4	444
270	1,96	1.553,9 ± 15,6	942,2 ± 49,0	61%	711,5 ± 37,0	46%	1.514,8 ± 78,8	97%	1.511,2 ± 78,6	97%	382,5 ± 19,9	455
296	1,64	1.264,2 ± 12,7	558,2 ± 29,3	44%	486,8 ± 25,5	39%	1.237,4 ± 64,9	98%	1.218,5 ± 63,9	96%	312,2 ± 16,4	382
327	1,34	1.007,4 ± 10,1	292,3 ± 15,2	29%	280,2 ± 14,5	28%	998,5 ± 51,8	99%	974,9 ± 50,5	97%	165,8 ± 8,6	209
354	1,24	1.091,2 ± 10,9	375,9 ± 20,2	34%	369,6 ± 19,8	34%	1.085,7 ± 58,3	99%	1.057,9 ± 56,8	97%	203,7 ± 10,9	220

Tabela 7: Área de abertura do concentrador, potência incidente, fator de interceptação, fluxo máximo de energia e razão de concentração de energia no foco do concentrador estudado.

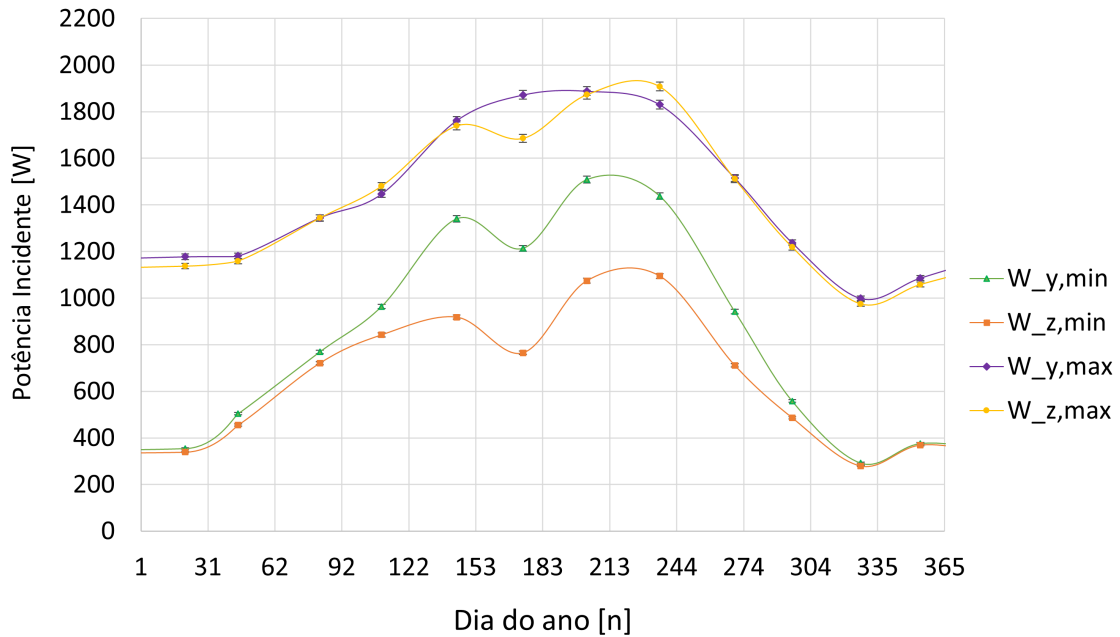


Figura 6.14: Potência incidente nas regiões do foco.

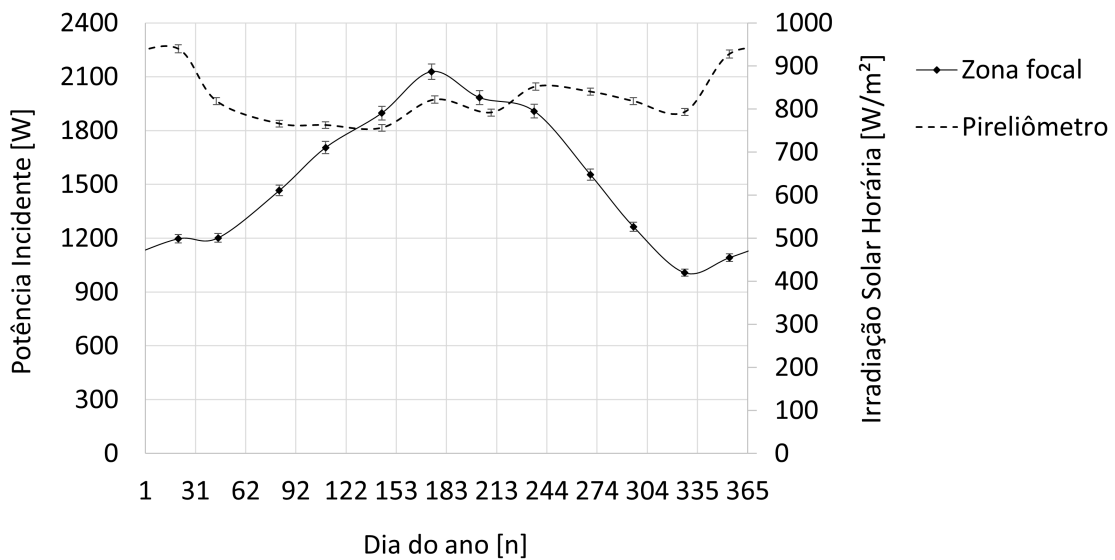


Figura 6.15: Potência incidente no plano focal e irradiação solar horária média entre 11h30 e 12h30.

Observou-se que as curvas do fator de interceptação e da potência incidente não apresentaram simetria, tendo em vista que os experimentos não foram realizados nos dias médios dos meses dada a dificuldade em conciliar as condições climáticas adequadas para a execução dos experimentos, que os valores históricos de DNI utilizados nas calibrações são únicos de cada imagem analisada e que a distribuição dos feixes está relacionada aos ajustes e às características do concentrador. Fatores como o DNI, a área de abertura do refletor, os ajustes e o processo construtivo interferem na intensidade do pico do fluxo de energia na imagem.

A potência incidente na zona focal conforme a variação do diâmetro da abertura de um receptor com geometria circular foi obtida a partir do fator de interceptação e da potência incidente no plano focal. A figura 6.16 mostra este comportamento considerando o intervalo de uma hora em torno do meio-dia solar. A inclinação da curva do fator de interceptação do dia 174 foi menor conforme apresentado anteriormente na Figura 6.12. Essa característica refletiu na intensidade da potência que incide no receptor. Potências maiores foram obtidas em outras datas para aberturas inferiores a 200 mm, ainda que houvesse uma maior potência incidente no plano focal no dia 174.

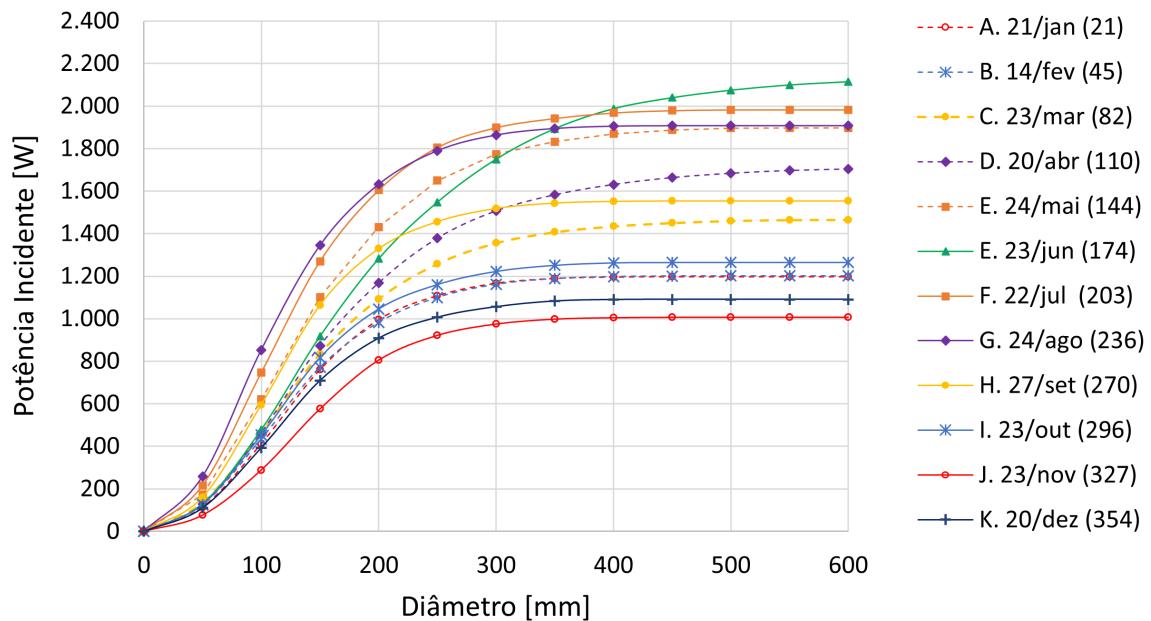


Figura 6.16: Potência incidente na abertura de um receptor circular durante 1h em torno do meio-dia solar.

As curvas da distribuição do fluxo nos experimentos foram colocadas na figura 6.17. Obteve-se picos mais elevados em datas próximas aos equinócios, o que indicou uma elevada razão de concentração de energia nessas épocas. O fluxo máximo atingido variou de $165,8 \text{ kW/m}^2$ a $382,5 \text{ kW/m}^2$ em $n = 327$ e 270 , respectivamente. Em um concentrador perfeito, espera-se que os picos dos fluxos sejam mais elevados nas datas próximas ao solstício de junho, visto que a potência incidente no foco é superior do que nas demais épocas do ano. Do mesmo modo, picos inferiores são esperados que ocorram nas datas próximas ao solstício de dezembro.

Em geral, o fluxo máximo de energia atingiu os menores valores em torno do solstício de dezembro e os maiores em torno dos equinócios. Essa divergência tem relação com os processos de ajuste e construção que resultam em deformações irregulares na superfície refletora. Houve um alargamento do comprimento horizontal das curvas próximas ao solstício de junho ($n = 144, 174$ e 203) nas regiões de médio e baixo fluxo, o qual contém uma parcela de fluxo deslocada do centro

que contribui com a redução da intensidade do pico. As distribuições dos feixes dependem das características singulares e de ajustes de cada concentrador, o que pode resultar em variações.

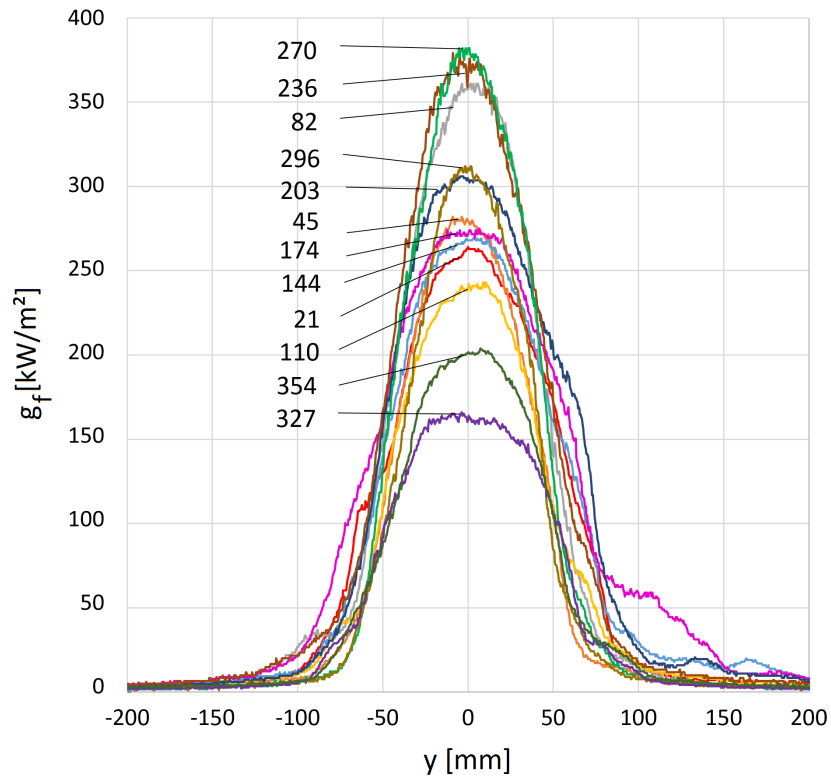


Figura 6.17: Fluxo de energia no eixo y da imagem.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho, analisou-se a imagem de um concentrador de Scheffler Sul conforme a variação da declinação solar em relação à geometria e à potência incidente. O concentrador estudado possui uma área de abertura de projeto de 2 m^2 no equinócio. O estudo foi feito a partir do modelo teórico de formação da imagem e de experimentos realizados mensalmente durante um ano. O método de aferição do fluxo escolhido foi o indireto que utilizou uma placa lambertiana e uma câmera digital CANON Rebel T6i com sensor CMOS. Calibrou-se os dados históricos de irradiação obtidos por um pireliômetro localizado no IAG-USP, situado próximo ao local do experimento. Os dados foram coletados nos anos de 2013 a 2021 nas datas dos experimentos e em dias com predominância em céu aberto.

A análise teórica avaliou a variação da abertura do concentrador e dimensões da imagem de acordo com a sazonalidade e o ângulo de abertura do cone óptico. A área de abertura do SS estudado apresentou um comportamento cíclico ao longo do ano com simetria em datas próximas às dos solstícios e oscilação em torno de 2 m^2 . Observou-se uma maior área de captação de energia no inverno de $2,74 \text{ m}^2$ e uma menor no verão de $1,24 \text{ m}^2$.

A abertura média do cone de reflexão devido ao concentrador (θ_b) de $38,3 \text{ mrad}$ foi estimada a partir da correlação dos eixos teóricos e experimentais. Considerou-se que os espelhos possuíram um θ_m de $12,5 \text{ mrad}$ e o disco solar um θ_s de $4,7 \text{ mrad}$, o que resultou em um ângulo de desvio total de $55,5 \text{ mrad}$. As variações da área de abertura do concentrador e da imagem ocorrem devido à mudança no formato da superfície refletora que se adapta à declinação solar nas diferentes épocas do ano. Considerando o ângulo de desvio médio obtido, a área do núcleo teve uma variação de $3,0 \pm 0,3 \text{ cm}^2$ a $7,9 \pm 0,5 \text{ cm}^2$, e a da fronteira de $25,0 \pm 1,0 \text{ cm}^2$ a $36,0 \pm 1,2 \text{ cm}^2$.

Para as análises do fator de interceptação, representou-se a abertura circular de um receptor com a inserção de circunferências com o centro sobre o centroide da zona de concentração de energia. Ao considerar diâmetros equivalentes aos comprimentos teóricos dos eixos y e z do núcleo e fronteira, pelo menos 79% da energia solar concentrada incidiu na área da fronteira. Os maiores percentuais de energia incidente no núcleo ocorreram quando a área de abertura do concentrador

esteve entre as maiores, e houve uma variação de 28% (em janeiro e novembro) a 76% (em julho).

O sistema foi calibrado com base na irradiação média no intervalo de uma hora em torno do meio-dia solar. A potência incidente na zona focal esteve entre $1.007,4 \pm 10,1$ W em novembro e $2.128,8 \pm 21,3$ W em junho, em razão de o aumento da área do SS estudado permitir uma maior captação de energia nessa época. O pico do fluxo de energia atingiu o menor valor em $n = 327$ e o maior em $n = 270$, sendo $165,8 \pm 8,6$ kW/m² e $382,5 \pm 19,9$ kW/m², respectivamente. Em geral, valores menores ocorreram em datas próximas ao solstício de dezembro e maiores em datas próximas aos equinócios.

Observou-se um alargamento horizontal da distribuição em datas próximas do solstício de junho, cuja parcela de fluxo deslocada do centro contribuiu para a redução da intensidade do pico. Espera-se que os valores dos picos sigam uma tendência semelhante à curva de potência incidente do foco em concentradores perfeitos, ou seja, que os picos máximos e mínimos sejam atingidos quando próximo do solstício de junho e dezembro, nesta ordem. Essa divergência está associada aos processos construtivo e de ajuste que provocam deformações irregulares na superfície refletora de concentradores reais. De modo geral, os resultados obtidos apresentaram concordância com o funcionamento de concentradores solares do tipo Scheffler.

8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Este estudo se aprofundou no comportamento da imagem de um SS ao longo de um ano considerando a sua geometria e potência incidente. Os resultados deste trabalho podem ser utilizados nos seguintes propostas de trabalhos futuros.

- Análise da distribuição da temperatura no plano focal e como referência em projetos de receptores que visam maximizar a captação e o aproveitamento da energia.
- Caracterização do fluxo de energia de concentradores de Scheffler pelo método direto utilizando um radiômetro.
- Escolha de materiais e desenvolvimento de métodos construtivos e de ajustes que reduzam o ângulo de desvio óptico para a obtenção de um foco com maior qualidade.
- Dimensionamento da área de abertura do concentrador conforme a irradiação local para atender as necessidades do tipo de aplicação.
- Avaliação de soluções ativas para adequar o fluxo de energia no receptor de forma compatível com a capacidade de transferência de calor do fluido de trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABUSEADA, M.; OZALP, N. Experimental and numerical study on a novel energy efficient variable aperture mechanism for a solar receiver. *Solar Energy*, v. 197, p. 396–410, 2020. ISSN 0038-092X. Disponível em: [〈https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20300220〉](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20300220).
- ACHARYA, H.; CHANDAK, A. Production of plaster of paris using solar energy. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, v. 02, p. 516–519, 04 2013.
- AFZAL, A. et al. Development of hybrid solar distillation system for essential oil extraction. *Renewable Energy*, v. 113, p. 22–29, 2017. ISSN 0960-1481. Disponível em: [〈https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117304123〉](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117304123).
- AGRAWAL, H.; YADAV, A. A scheffler solar concentrator heat transfer model used in forced-circulation ice melting system at high-altitude regions. *Environment, Development and Sustainability*, v. 23, 02 2020.
- ALBERTI, S. *Analysis and optimization of the Scheffler Solar Concentrator*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Politécnica Estadual da Califórnia, Departamento de Engenharia Mecânica, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, San Luis Obispo, Estados Unidos da América, 2014.
- BAJAJ, R.; RAJ, A.; SRINIVAS, T. Mathematical modelling and analysis of variation in surface of solar scheffler concentrator for seasonal variations. In: . [S.l.: s.n.], 2016. p. 78–83.
- BALASUBRAMANIAN, K.; SRINIVAS, T.; RAMAN, S. Experimental study on power generation using biomass based and solar based brayton cycles. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 10, 01 2015.
- BALLESTRÍN, J. et al. Simplifying the measurement of high solar irradiance on receivers. application to solar tower plants. *Renewable Energy*, v. 138, 02 2019.
- CASTRO, L. C. e. *Análise comparativa para geração de energia heliotérmica em diferentes regiões brasileiras*. [s.n.], 2016. Disponível em: [〈https://bdm.unb.br/bitstream/10483/13369/1/2016_LaisCostaeCastro.pdf〉](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/13369/1/2016_LaisCostaeCastro.pdf).
- CHANDAK, A.; SOMANI, S. Industrial oven powered with a pair of scheffler solar reflectors. In: . [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–8.
- CHAUHAN, V. K. et al. A comprehensive review of direct solar desalination techniques and its advancements. *Journal of Cleaner Production*, v. 284, p. 124719, 2021. ISSN 0959-6526. Disponível em: [〈https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620347636〉](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620347636). Acesso em: 18 out. 2021.
- CHERIF, H. et al. A receiver geometrical details effect on a solar parabolic dish collector performance. *Energy Reports*, v. 5, p. 882–897, 2019. ISSN 2352-4847. Disponível em: [〈https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484718302889〉](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484718302889).

CISNEROS-CÁRDENAS, N. A. et al. Image and ray tracing analysis of a parabolic dish collector to achieve high flux on a solar volumetric reactor. *MRS Advances*, Materials Research Society, v. 5, n. 50, p. 2545–2553, 2020.

COSTA, I. F. da; MAROJA, A. de M. Astronomia diurna: medida da abertura angular do sol e da latitude local. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, n. 1, 2018.

DIB, E.; FIORELLI, F. Analysis of the image produced by scheffler paraboloidal concentrator. In: . [S.l.: s.n.], 2015.

DIB, E. A. *Análise da formação de imagem focal do concentrador solar paraboloidal tipo Scheffler*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, São Paulo, Brasil, 2021.

DIEZ, F. et al. Estimation of the hourly global solar irradiation on the tilted and oriented plane of photovoltaic solar panels applied to greenhouse production. *Agronomy*, v. 11, p. 495, 03 2021.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4. ed. New Jersey: John Wiley Sons, Ltd., 2013.

EPE. *BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN): Ano base 2022*. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S\%C3\%ADntese_2023_PT.pdf. Acesso em: 24 JUL. 2023.

GOLDEMBERG, J. Energia e desenvolvimento. *Estudos Avançados*, v. 12, n. 33, p. 7–15, ago. 1998. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/9402>.

GOMES, E. N. et al. Estimativa da radiação direta na incidência horária, diária e mensal em função do Índice de claridade (kt). In: *I Congresso Brasileiro de Energia Solar*. [S.l.: s.n.], 2007.

GRÁH, V. de F. *Avaliação do posicionamento de geradores fotovoltaicos com sistema rastreador manual aplicado ao bombeamento de água para irrigação*. 2015. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-09042015-153400/publico/Vanessa_de_Fatima_Grah_versao_revisada.pdf.

HAHN, P. et al. *Energia termossolar para a indústria. Brasil*. 2018.

HE, Y. et al. Study on the coupled photon-thermal-stress integration method, characteristics with time and failure criterion in the solar molten salt cavity receiver. *Chinese Science Bulletin*, v. 62, p. 4307–4320, 2017.

HE, Y.-L. et al. Review of the solar flux distribution in concentrated solar power: Non-uniform features, challenges, and solutions. *Applied Thermal Engineering*, v. 149, p. 448–474, 2019. ISSN 1359-4311. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431118360769>.

HUDON, K. Chapter 20 - solar energy – water heating. In: LETCHER, T. M. (Ed.). *Future Energy (Second Edition)*. Second edition. Boston: Elsevier, 2014. p. 433–451. ISBN 978-0-08-099424-6. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978008099424600020X>. Acesso em: 13 dez. 2022.

INDIA-ONE. *Solar Thermal Plant*. 2017. India One, Rajastão, Índia. Disponível em: [⟨https://india-one.net⟩](https://india-one.net). Acesso em: 18 out. 2021.

INDORA, S.; KANDPAL, T. C. Institutional cooking with solar energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 84, p. 131–154, 2018. ISSN 1364-0321. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117315320⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117315320). Acesso em: 05 fev. 2021.

IODICE, P. et al. Combined use of volumetric expanders and Scheffler receivers to improve the efficiency of a novel direct steam solar power plant. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH*, 2021.

JEYS, T. H.; VANT-HULL, L. L. The contribution of the solar aureole to the measurements of pyrhelimeters. *Solar Energy*, v. 18, n. 4, p. 343–348, 1976. ISSN 0038-092X. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X7690061X⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X7690061X).

KUMAR, A.; PRAKASH, O.; KAVITI, A. A comprehensive review of scheffler solar collector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 04 2017.

LEÃO, R. A agenda 2030 das nações unidas e as energias renováveis no brasil. In: . Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2019. v. 60, p. 24. Disponível em: [⟨http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/9398?mode=full⟩](http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/9398?mode=full). Acesso em: 12 dez. 2022.

LI, Q. et al. A modified indirect flux mapping system for high-flux solar simulators. *Energy*, v. 235, p. 121311, 2021. ISSN 0360-5442. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221015590⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221015590). Acesso em: 31 jan. 2022.

MELLALOU, A. et al. Design methodologies of scheffler concentrators. In: . [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–4.

MORAN, E. F. et al. Sustainable hydropower in the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 115, n. 47, p. 11891–11898, 2018. Disponível em: [⟨https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1809426115⟩](https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1809426115).

MUNIR, A.; HENSEL, O.; SCHEFFLER, W. Design principle and calculations of a scheffler fixed focus concentrator for medium temperature applications. *Solar Energy*, v. 84, p. 1490–1502, 08 2010.

NEUMANN, A. et al. Representative terrestrial solar brightness profiles. In: . [S.l.: s.n.], 2002. v. 124.

OELHER, U.; SCHEFFLER, W. The use of indigenous materials for solar conversion. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 33, n. 3, p. 379–387, 1994. ISSN 0927-0248. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0927024894902399⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0927024894902399).

PANCHAL, H. et al. Different applications of scheffler reflector for renewable energy: A comprehensive review. *International Journal of Ambient Energy*, v. 41, p. 1–31, 05 2018.

PEREIRA, E. B. et al. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. 2. ed. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2017. Disponível em: [⟨http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017⟩](http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017). Acesso em: 17 dez. 2022.

QIU, K. et al. Simulation and experimental study of an air tube-cavity solar receiver. *Energy Conversion and Management*, v. 103, p. 847–858, 2015. ISSN 0196-8904. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415006640⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415006640).

- REDDY, D. S.; KHAN, M. Design and ray tracing of multifaceted scheffler reflector with novel crossbars. *Solar Energy*, v. 185, p. 363–373, 05 2019.
- REDDY, D. S. et al. Design charts for scheffler reflector. *Solar Energy*, v. 163, p. 104–112, 03 2018.
- ROOSENDAAL, C.; SWANEPOEL, J.; ROUX, W. L. Performance analysis of a novel solar concentrator using lunar flux mapping techniques. *Solar Energy*, v. 206, p. 200–215, 08 2020.
- SARAIVA, M. de F. O.; OLIVEIRA-FILHO, K. de S.; MÜLLER, A. M. *Aula 3 - Movimento anual do Sol e estações do ano*. [S.l.], 2010.
- SCHEFFLER, W. Introduction to the revolutionary design of scheffler reflectors. *Solare Bruecke*, 2006.
- SCHMITZ, M. et al. On-sun optical characterization of a solar dish concentrator based on elliptical vacuum membrane facets. *Solar Energy*, v. 153, p. 732–743, 2017.
- SCHUBNEL, M. Sunshape and its influence on the flux distribution in imaging solar concentrators. *Journal of Solar Energy Engineering-transactions of The Asme*, v. 114, p. 260–266, 1992.
- SHUAI, Y.; XIA, X.-L.; TAN, H.-P. Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems. *Solar Energy*, v. 82, n. 1, p. 13–21, 2008. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X07001235>.
- SOLARE-BRUECKE. Construction manuals. 2010. Disponível em: <http://www.solare-bruecke.org/index.php/en/die-scheffler-reflektoren/bauanleitungen>.
- SOLARGIS. *Solar resource map of Brazil: Direct Normal Irradiation*. 2019. Disponível em: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/brazil>. Acesso em: 07 jan. 2021.
- STRAPASSON, A. B. *A Energia Térmica e o Paradoxo da Eficiência Energética: Desafios para um Novo Modelo de Planejamento Energético*. 2004. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-25092005-155030/publico/dissertacao_strapasson.pdf.
- SULYOK, C. *Avaliação econômica de energia heliotérmica concentrada no semi-árido baiano*. 2014. Disponível em: https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/16993/1/disserta_%c3\%a7_%c3\%a3o_%20mertrado_%20ultima.pdf.
- TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira: uma perspectiva. *Novos estudos CEBRAP*, scielo, p. 47 – 69, 11 2007. ISSN 0101-3300. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-33002007000300003&nrm=iso.
- TYROLLER, M. *Solar steam sterilizer for rural hospitals*. Alemanha: [s.n.], 2006. Disponível em: http://www.solare-bruecke.org/infoartikel/Papers_%20from_SCI_Conference_2006/34_michael_tyroller.pdf. Acesso em: 16 out. 2021.
- VERDÉLIO, A. *Termelétricas entram em operação com a chegada da seca*. 2018. Agência Brasil. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2018-07/termeltricas-entram-em-operacao-com-chegada-da-seca>. Acesso em: 11 jan. 2021.

VIEIRA, B. E.; ZAPPAROLI, I. D.; CALDARELLI, C. E. Cenário energético brasileiro para o período de 2010 a 2030: Inserção de energias alternativas nos setores econômicos. 2019. Disponível em: <http://corecon-sc.org.br/anais-cbe2019/arquivos/anais-cbe2019-4785.pdf>.

WATAL, R. P. et al. [S.l.]: Sun Focus: A quarterly magazine on concentrated solar heat. Bosch Ltd: Using Scheffler dishes for cooking, 2013.

XIA, X.-L.; DAI, G.-L.; SHUAI, Y. Experimental and numerical investigation on solar concentrating characteristics of a sixteen-dish concentrator. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 37, n. 24, p. 18694–18703, 2012. ISSN 0360-3199. 2011 International Workshop on Molten Carbonates Related Topics. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319912021817>.

XIAO, L. et al. Optical-thermal conversion characteristics of cylindrical receiver with built-in helically coiled tubes. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 37, p. 100626, 2020. ISSN 2213-1388. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138819306290>.

APÊNDICE A – CÓDIGO PARA O PROCESSAMENTO DAS FOTOGRAFIAS NO MATLAB

O código apresentado a seguir foi adaptado de Dib (2021) para se adequar às fotografias da câmera Canon EOS 700D com um sensor CMOS utilizada neste trabalho. A seção 6.2 e os comentários adicionados ao código buscam auxiliar o entendimento do método adotado no processamento das imagens.

```

clc
clear all
Image=imread('D:\Mestrado\Dissertacao\Fotografias\Medicoes\
    Med13_23-06-2022\IMG_9166.JPG');

%ALVO LAMBERTIANO
%Transformar a imagem em escala de cinza
A=rgb2gray(Image);
%Saturnar a imagem para ser possivel visualizar a placa
B=imlincomb(30,A);
imtool(B)
%Calcular a entropia dos 8 pixels ao redor do ponto
C=entropyfilt(B);
%Inverter a cor da imagem: todos os pixels positivos se tornam
    1 (branco) e os demais 0 (preto).
%Converter a imagem em escala de cinza binaria, preto e branco.
D = imcomplement(C);
%Mascara: permancer apenas a placa lambertiana na fotografia

```

```

%F-Mascara; G-Produto entre D (imagem original) e E (poligono
    que delimita a placa)
c=[2696 4040 3362 2092]; %Coordenada x
r=[544 546 3422 2941]; %Coordenada y
E=roipoly(D,c,r);
F=D.*E;
Q1mask=imfuse(F,B);figure,imshow(Q1mask),title('Q1mask') %Criar
    a mascara

%FRONTEIRA DA IMAGEM
%Converter todos os tons de cinza em uma imagem binaria
%Substituir todos os pixels da imagem de entrada com a
    luminancia maior ou igual ao valor inserido por 1 (branco) e
    substituir os demais por 0 (preto).
G=im2bw(A,0.02);
%Retornar uma imagem binaria contendo os objetos que sobrepoem
    o pixel (d,e)
d=[2998]; %Coordenada x
e=[2067]; %Coordenada y
H=bwselect(G,d,e,4)
%Retornar o numero de elementos na matriz. Nesta etapa, e
    importante aparecer apenas 1 elemento
CC=bwconncomp(H)
%Suavizar a fronteira do elemento
I=imfilter(H,fspecial('average',[16 16]));
%Retornar as coordenadas do centroide do elemento I
hold on
J=regionprops(I,'centroid')
Jx=3.0005e+03;
Jy=1.9679e+03;
plot(Jx,Jy,'*b') %Plotar o centroide
hold off

```

```

%BINARIZACAO
%Utilizada para calcular o fluxo na placa
D2=(C>0.9);
se=strel('disk',17);
D3=imclose(D2,se); %Reduzir as imperfeicoes da borda
D4=imcomplement(D3);
K=bwselect(D4,d,e,4)
b=immultiply(K,B)

%LINHAS DE FUGA
%EES: obter os pontos de fuga e as constantes das retas dos
      eixos y e z
Ab1=-3.969;Ab2=-4.242;Aref_z1=-0.001488;Aref_z2=0.3787;Apf_y
      =-4.097; Apf_z=0.1974;
Bb1=11243;Bb2=17683;Bref_z1=540;Bref_z2=2149;Bpf_y=14260;Bpf_z
      =1376;
xb1=472:1082;
xb2=2834:3435;
xrefz1=1:3438;
xrefz2=1:3438;
x_y=1:4096;
x_z=1:4096;
yb1=Ab1*xb1+Bb1; %Equacao da borda y1
yb2=Ab2*xb2+Bb2; %Equacao da borda y2
yrefz1=Aref_z1*xrefz1+Bref_z1; %Equacao da borda z1
yrefz2=Aref_z2*xrefz2+Bref_z2; %Equacao da borda z2
y_y=Apf_y*x_y+Bpf_y; %Equacao do eixo y passando pelo centro (
      xc,yc)
y_z=Apf_z*x_z+Bpf_z; %Equacao do eixo z passando pelo centro (
      xc,yc)
plot(x_y,y_y,'-.b',x_z,y_z,'-.b'); %Plotar as retas que cruzam
      o centroide e passam pelos pontos de fuga
%Tracar os eixos y e z

```

```

xb1z=(Bb1-Bpf_z)/(Apf_z-Ab1); %Coordenada x do ponto B1
xb2z=(Bb2-Bpf_z)/(Apf_z-Ab2); %Coordenada x do ponto B2
yb1z=Ab1*xb1z+Bb1; %Coordenada y do ponto B1
yb2z=Ab2*xb2z+Bb2; %Coordenada y do ponto B2
lalvo_px=abs(((xb2z-xb1z)^2+(yb1z-yb2z)^2)^0.5); %Largura da
    placa em pixel
lalvo_m=593; %Largura da placa [mm]
r_pxmm=lalvo_px/lalvo_m; %Escala de pixel para cada 1 mm

%IMAGEM
alpha=54.40791913*pi/180; %Angulo entre o foco-camera-eixo
    sazonal
alpha_y=76.28; %EES: angulo entre o centroide-PF1-reta
    horizontal
wymn=394.7; %[mm]
wzmn=394.7; %[mm]
wymx=394.7; %[mm]
wzmx=394.7; %[mm]
positionwymn=[(Jx-((r_pxmm*wymn)*sin(alpha))/2)(Jy-(r_pxmm*
    wymn)/2)((r_pxmm*wymn)*sin(alpha))(wymn*r_pxmm)];
positionwzmn=[(Jx-((r_pxmm*wzmn)*sin(alpha))/2)(Jy-(r_pxmm*
    wzmn)/2)((r_pxmm*wzmn)*sin(alpha))(wzmn*r_pxmm)];
positionwymx=[(Jx-((r_pxmm*wymx)*sin(alpha))/2)(Jy-(r_pxmm*
    wymx)/2)((r_pxmm*wymx)*sin(alpha))(wymx*r_pxmm)];
positionwzmx=[(Jx-((r_pxmm*wzmx)*sin(alpha))/2)(Jy-(r_pxmm*
    wzmx)/2)((r_pxmm*wzmx)*sin(alpha))(wzmx*r_pxmm)];
figure %wymn
h_im=imshow(G);
hold on
plot(x_y,y_y,'-.b',x_z,y_z,'-.b'); %Plotar as retas que passam
    pelo centroide e os pontos de fuga (eixos y e z)
ewymn=imellipse(gca,positionwymn);
hold off

```



```

wymask=createMask(ewymask,h_im);
wymaskr=imrotate(wymask,-(90-alpha_y),'bilinear','crop');
omask=regionprops(wymaskr,'centroid')
omaskx=3005; %Ajuste do centro da elipse
omasky=1970; %Ajuste do centro da elipse
Q1maskwymask=imtranslate(wymaskr,[(Jx-omaskx)(Jy-omasky)]);
A2=imfuse(B,Q1maskwymask);figure,imshow(A2),title('Q1 wymask');
hold on
plot(x_y,y_y,'-.b',x_z,y_z,'-.b');
hold off
figure %wzmin
h_im=imshow(G);
hold on
plot(x_y,y_y,'-.b',x_z,y_z,'-.b');
ewzmin=imellipse(gca,positionwzmin);
hold off
wzminmask=createMask(ewzmin,h_im);
wzminmaskr=imrotate(wzminmask,-(90-alpha_y),'bilinear','crop');
omask=regionprops(wzminmaskr,'centroid')
omaskx=3005;
omasky=1970;
Q1maskwzmin=imtranslate(wzminmaskr,[(Jx-omaskx)(Jy-omasky)]);
B=imfuse(B,Q1maskwzmin);figure, imshow(B),title('Q1 wzmin');
hold on
plot(x_y,y_y,'-.b',x_z,y_z,'-.b');
hold off
figure %wymax
h_im2=imshow(B);
hold on
plot(x_y,y_y,'-.b',x_z,y_z,'-.b');
ewymax=imellipse(gca,positionwymax);
hold off
wymaxmask=createMask(ewymax,h_im);

```

```

wymaxmaskr=imrotate(wymaxmask,-(90-alpha_y),'bilinear','crop');
omask=regionprops(wymaxmaskr,'centroid')
omaskx=3005;
omasky=1970;
Q1maskwymax=imtranslate(wymaxmaskr,[(Jx-omaskx)(Jy-omasky)]);
C=imfuse(B,Q1maskwymax);figure,imshow(C),title('Q1 wymax');
hold on
plot(x_y,y_y,'-.b',x_z,y_z,'-.b');
hold off
figure %wzmax
h_im2=imshow(B);
hold on
plot(x_y,y_y,'-.b',x_z,y_z,'-.b');
ewzmax=imellipse(gca,positionwzmax);
hold off
wzmaxmask=createMask(ewzmax,h_im);
wzmaxmaskr=imrotate(wzmaxmask,-(90-alpha_y),'bilinear','crop');
omask=regionprops(wzmaxmaskr,'centroid')
omaskx=3005;
omasky=1970;
Q1maskwzmax=imtranslate(wzmaxmaskr,[(Jx-omaskx)(Jy-omasky)]);
D=imfuse(B,Q1maskwzmax);figure,imshow(D),title('Q1 wzmax');
hold on
plot(x_y,y_y,'-.b',x_z,y_z,'-.b');
hold off

%GRAFICOS 3D: Superficie da imagem
%Retornar a imagem binaria contendo o objeto que sobrepoe o
    pixel (d,e) da matriz G (zona de fronteira)
L=bwselect(G,d,e,4)
imtool(L)
%Multiplicar a matriz A (preta e branca) pela matriz G
c=immultiply(L,A)

```

```

X=1:1:6000;
Y=1:1:4000;
[xx,yy]=meshgrid(X,Y);
i=im2double(c)
figure;mesh(xx,yy,i)
colorbar
figure;imshow(i)
i(i==0)=nan; %Eliminar os valores nulos do grafico
figure;mesh(xx,yy,i)
colorbar
figure;imshow(i)
Q1focomask=uint16(c); %Tranformar a matriz c em 16 bits
sQ1foco=sumabs(Q1focomask) %Somar dos valores de cinza da zona
    focal
Q1wymmin=immultiply(c,Q1maskwymmin);sQ1wymmin=sumabs(Q1wymmin) %
    Somar dos valores de cinza de Wy_min
Q1wzmin=immultiply(c,Q1maskwzmin);sQ1wzmin=sumabs(Q1wzmin) %
    Somar dos valores de cinza de Wz_min
Q1wymmax=immultiply(c,Q1maskwymmax);sQ1wymmax = sumabs(Q1wymmax) %
    Somar dos valores de cinza de Wy_max
Q1wzmax=immultiply(c,Q1maskwzmax);sQ1wzmax=sumabs(Q1wzmax) %
    Somar dos valores de cinza de Wz_max

%POTENCIA INCIDENTE
A_ap_n=2.74; %Area de abertura teorica [m^2]
Irr_n=822; %Irradiacao entre 11h30 e 12h30 [W/m^2]
G_Q=Irr_n*A_ap_n*0.995*0.95;
F_cinza=G_Q/sQ1foco %[W/Valor de pixel]
G_Q1wymmin=F_cinza*sQ1wymmin %Radiacao solar em wy_min [W]
G_Q1wzmin=F_cinza*sQ1wzmin %Radiacao solar em wz_min [W]
G_Q1wymmax=F_cinza*sQ1wymmax %Radiacao solar em wy_max [W]
G_Q1wzmax=F_cinza*sQ1wzmax %Radiacao solar em wz_max [W]

```