

ERICK ALFRED DIB

**ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE IMAGEM
FOCAL DO CONCENTRADOR SOLAR
PARABOLOIDAL TIPO SCHEFFLER**

SÃO PAULO

2021

ERICK ALFRED DIB

**ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE IMAGEM FOCAL DO
CONCENTRADOR SOLAR PARABOLOIDAL TIPO
SCHEFFLER**

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Universidade de São Paulo – USP

Escola Politécnica da USP

Versão Corrigida

Orientador: Prof. Livre-Docente Flávio Augusto Sanzovo Fiorelli

SÃO PAULO

2021

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, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Dib, Erick Alfred

Análise da formação de imagem focal do concentrador solar parabólico tipo Scheffler / E. A. Dib -- versão corr. -- São Paulo, 2021.

205 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Energia solar 2.Concentrador Scheffler 3.Formação de imagem
4.Modelagem I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

ERICK ALFRED DIB

ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE IMAGEM FOCAL DO CONCENTRADOR SÓLAR PARABOLOIDAL TIPO SCHEFFLER

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Trabalho aprovado. SÃO PAULO, 04 de janeiro de 2021:

**Prof. Livre-Docente Flávio Augusto
Sanzovo Fiorelli (Orientador)**

Prof. dr. Celestino Rodrigues Ruivo

**Prof. dr. Luiz Guilherme Meira De
Souza**

Prof. dr. Renan Tavares Figueiredo

**Prof. Livre-Docente Alberto
Hernandez Neto**

SÃO PAULO
2021

"As máximas 'Buscai e achareis' é análoga à 'Ajuda-te, e o céu te ajudará'. É o princípio da lei do trabalho, e, por conseguinte, da lei do progresso, porque o progresso é filho do trabalho, e o trabalho coloca em ação as forças da inteligência." Allan Kardec.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade, força e condições para a realização deste trabalho.

À minha esposa Tatiana e filhas Valentina e Victoria, pelo amor, paciência, compreensão e esperança depositado em mim durante este período.

Aos meus pais, pelo amor incondicional direcionado a mim, em forma de educação e ensino dos valores de família e missões de vida.

Aos meus avós, que me ensinaram o precioso valor da família e instalaram em minha memória preciosos conselhos: "o estudo é a luz da vida".

À minha irmã, Gabriela, que ajudou a viabilizar a bancada deste trabalho.

Ao professor Flávio Augusto Sanzovo Fiorelli pelo acolhimento e pela orientação bem direcionada com o objetivo no progresso deste trabalho.

Ao professor Raul Gonzalez Lima, pela orientação em momentos críticos apoiando a continuidade deste projeto.

Aos professores Guenther Carlos Krieger Filho e Sílvio de Oliveira Júnior pela ótima arguição na banca de qualificação deste trabalho.

Ao professor Cláudio Roberto de Freitas Pacheco pelas horas de sábias orientações, não somente de engenharia solar, mas também de vida, pelo seu exemplo.

A Isabel Kodama, pelo grande auxílio nos trabalhos experimentais e ajustes no texto da tese.

Ao Gustavo Moreira Dias, pela grande ajuda nos trabalhos experimentais durante a pandemia.

Ao professor Amauri Pereira de Oliveira e a Georgia Codato do Laboratório de Micrometeorologia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG-USP) pela gentileza e grande ajuda com os dados do pireliômetro.

A Liliana, ao Rinaldo e ao Marcelo, do laboratório Ilumina, do IEE/USP, pelas medições de luminância do alvo lambertiano.

Ao professor José Roberto Simões Moreira pelas oportunidades iniciais e aprimoramento técnico.

A todos os amigos que ganhei na Escola Politécnica da USP.

Novamente, agradeço a Deus pela minha abençoada família, aos meus pais e avós por me criarem e às minhas amadas Tati, Valentina e Victoria, muito obrigado pelo apoio,

compreensão e muita paciência dedicados a mim.

RESUMO

O concentrador solar tipo Scheffler é um refletor parabolooidal que mantém o foco fixo em um receptor estacionário, enquanto o refletor se move com o sistema de rastreamento. Essa característica se deve à sua geometria, definida pelo traço entre uma paráboloide teórica e um plano a $43,23^\circ$, e pelo sistema de rastreamento em dois eixos. Na literatura, há importantes trabalhos voltados para as definições da geometria complexa do refletor Scheffler e diversas demonstrações de aplicações. Já a questão da formação da imagem focal do concentrador Scheffler e do fluxo de energia solar foram pouco exploradas. O conhecimento sobre a formação de imagem de um concentrador solar é importante para processos de otimização de receptores. Assim, nesse trabalho foi realizada uma modelagem matemática para estimativa da curva do fluxo de energia solar concentrada para o concentrador Scheffler Sul, isto é, o concentrador que está ao sul da zona focal. Na simulação, verificou-se que o sistema de rastreamento sazonal afeta a área de do refletor numa amplitude de duas condições de contorno: com e sem deformação na borda. O fluxo total e a curva de fluxo de energia disponível no foco também variam significativamente. A variação teórica máxima da área de abertura e o fluxo total na imagem do foco foram iguais, de 48% e 20%, respectivamente, para as duas condições de contorno. A data da maior fronteira do foco é a mesma data da menor núcleo, e vice versa, e o pico do fluxo variou 52%. As medições do foco foram realizadas em um concentrador Scheffler Sul com abertura de 2 m², em quatro dias ao longo de 4 meses, com uma câmera CMOS monocromática de 16 bits. Nestas medições, o perfil de fluxo e as variações dimensionais se mostraram coerentes com a simulação. Entre os quatro dias, o fator de interceptação do núcleo foi aproximadamente 0,5, com fluxos entre 413 W a 910 W. Na interceptação de regiões periféricas, o fluxo variou de 987 W a 1685 W, com fator de interceptação entre 0,87 e 0,99. As medições revelaram que a geometria das fronteiras do foco são modificadas com o acionamento do sistema de rastreamento sazonal, mas, ainda assim, as imagens registradas apresentaram boas concordâncias com as tendências vistas nas simulações. Este trabalho, enfim, sugere um modelo de cálculo para o diâmetro do núcleo e da fronteira do foco, que pode ser utilizado como ferramenta em processos de otimização de receptores para este tipo de concentrador solar.

Palavras-chaves: Energia solar, Concentrador Scheffler, Formação de imagem, Modelagem.

ABSTRACT

The Scheffler solar concentrator is a paraboloidal reflector that keeps the focus fixed in a stationary receiver, while the reflector moves according the tracking system. This feature is due to its geometry defined by trace between theoretic paraboloid and a plane at $43,23^\circ$, and by the two axes tracking system. In the literature, there are important papers focused to the definitions of the complex geometry of the Scheffler reflector and several demonstrations of applications. The issue of imaging of Scheffler concentrator and the flow of solar energy have been little explored. The knowledge of focus imaging of a solar concentrator is important top the optimizations processes of receivers. So, in this work a mathematical modeling was carried out to estimate the curve of flow of concentrated solar energy to South Scheffler concentrator, that is, the concentrator that is at south side of focal zone. In the simulations, it was found that the seasonal tracking system affects the area of the reflector in a range of two boundary conditions: with and without rim deformation. The total flow and the available focus energy flow curve also varies significantly. The maximum theoretic variations of aperture area and the total flow at focus were equals, of 48% and 20% respectively to the both boundaries conditions. The date of the largest border is the same date of the smallest nucleus, and vice versa, and the variations of the peak of the flow was 52%. The measurements of the focus were carried out in an South Scheffler solar concentrator with 2 m^2 of aperture area, by four days over four months, with a monochromatic 16 bits CMOS camera. In these measurements, the curve flow and dimensional variatios showed coherency among with the simulations . Among four days, the intercept factor of the nucleus was close to 0.5 with energy flow between 413 W and 910 W. In interception of boundaries regions, the flow varied from 987 W to 1685 W , with interception factor between 0.87 and 0.99. The measurements reveals that the geometry of focus boundary were modified as seasonal tracking systems works, but still, the registered images presented good agreement with trends shown by simulations. Finally, this work suggests a model of calculus to the core and boundary diameters of the focus to be applied as tool in receiver optimization processes too this type of solar concentrators.

Key-words: Solar energy, Scheffler concentrator, Imaging concentrator, Modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Mapa da radiação solar direta normal média anual do Brasil. Pereira et al. (2017).	29
Figura 1.2 – Mapa da radiação solar direta normal média do mês de agosto do Brasil em Wh/m ² .dia. Pereira et al. (2017).	30
Figura 1.3 – Consumo de energia em faixa de temperatura de alguns setores industriais. Dados do ano de 2003, segundo Vannoni et al. (2008).	31
Figura 2.1 – Perfis para coletores solares concentradores (DUFFIE; BECKMAN, 2013).	36
Figura 2.2 – Relação entre razão de concentração e temperatura de receptores (DUFFIE; BECKMAN, 2013).	38
Figura 2.3 – Paraboloide e seção lateral que compõe a superfície do concentrador solar Scheffler.	38
Figura 2.4 – Desenho esquemático da cozinha comunitária com concentrador solar Scheffler. Oelher e Scheffler (1994).	40
Figura 2.5 – Configuração dos eixos do heliostato. Ries e Schubnell (1990).	41
Figura 2.6 – Esquema da disposição dos equipamentos do coletor. Ries e Schubnell (1990).	41
Figura 2.7 – Fixação entre o bloco de aço e estanho com a carenagem de aço inox. Gotz (2003).	42
Figura 2.8 – Crematório Solar. Scheffler (2006a).	43
Figura 2.9 – Fluxo de ar saindo pelo orifício da cavidade do forno de cremação. Scheffler (2006a).	43
Figura 2.10 – Cozinha solar com vários concentradores solares Scheffler. Schapers (2009).	44
Figura 2.11 – Esquema do forno de Muller e Arias (2009)	46
Figura 2.12 – Absorvedor "zig-zag" e pedras (capacitores térmicos) do forno de Muller e Arias (2009)	46
Figura 2.13 – Esquema com dois concentradores e um forno Bhirud e Tandale (2006).	48
Figura 2.14 – Esquema do sistema de esterilização solar. Tyroller (2006).	49
Figura 2.15 – Receptor do concentrador solar Scheffler da autoclave de Tyroller (2006).	49
Figura 2.16 – Esquema do sistema de destilação de água de Chandak e Somani (2009).	50
Figura 2.17 – Sistema de destilação de água Chandak e Somani (2009).	51
Figura 2.18 – Sistema de aquecimento com dez concentradores Scheffler. Lukhi (2009).	52
Figura 2.19 – Esquema da unidade de destilação solar (MUNIR; HENSEL, 2010).	54

Figura 2.20	Concentrador solar Scheffler de 2,7 m ² de área elíptica, (a) espelhos de vidro e (b) sistema de rastreamento diário (DIB, 2009).	57
Figura 2.21	Esquema de distribuição dos termopares do receptor forno. Dib (2009).	57
Figura 2.22	Bancada experimental do coletor concentrador Scheffler de Dib (2009).	58
Figura 2.23	Curva da temperatura interna do forno durante o experimento de cozimento dos pães (SANTOS et al., 2016).	59
Figura 2.24	Perfil de temperaturas do receptor forno. Dib (2009).	60
Figura 2.25	Curvas da temperatura do absorvedor (T1), de calor do forno ($\dot{M}U$) das perdas de calor (\dot{Q}_l), do vazamento de ar (entalpia) ($\dot{m}h$) e da radiação solar total absorvida no absorvedor, ($\dot{S}S$) (DIB et al., 2020).	61
Figura 2.26	Curvas da diferença entre a temperatura média do forno e a temperatura ambiente ($T_{av;oven} - T_\infty$ e do índice de brilho (k_T). A constante de tempo foi de $t_o = 3888s$ (DIB et al., 2020).	62
Figura 2.27	Esquema de aquecimento via concentrador solar Scheffler no trabalho de Senthil e Cheralathan (2016).	62
Figura 2.28	Receptor em cavidade com parâmetros da modelagem do fenômeno térmico do sistema de Ruelas, Velázquez e Cerezo (2013). (Adaptado)	64
Figura 2.29	Curvas em função do diâmetro do receptor, D_o , para o fator de interceptação γ , energia útil Q_u , calor para o absorvedor Q_{abs} , calor perdido por convecção Q_{conv} e por radiação térmica Q_{rad} . Ruelas, Velázquez e Cerezo (2013).	64
Figura 2.30	Resultados do estudo em <i>Ray Tracing</i> incidente no refletor nos dois solstícios (RUELAS et al., 2014).	66
Figura 2.31	Resultado no estudo de <i>Ray Tracing</i> incidente na zona focal nos dois solstícios (RUELAS et al., 2014).	66
Figura 2.32	Resultados das análises em (a) <i>Ray Tracing</i> no CAD (RUELAS et al., 2014), (b) em MCRT (RUELAS; PALOMARES; PANDO, 2015) e (c) imagem focal capturada com câmera termográfica. (Adaptado)	67
Figura 2.33	À esquerda: sobreposição das imagens da câmera termográfica, em branco, do aplicativo de <i>Ray Tracing</i> , cinzenta, do resultado do MCRT, linha amarela, e da região com maior incidência, linha verde. À direita: resultado do MCRT, que é a abertura da cavidade, em linha amarela, e a região com maior incidência sobre os tubos do absorvedor, em linha verde.	67
Figura 2.34	Esquema da bancada experimental de Raza et al. (2019) (Adaptado).	68
Figura 2.35	Receptores RI, RII e RIII com relação H/D de (a) 0,8, (b) 1,0, e (c) 1,2, respectivamente, e as medidas absolutas. Adaptado de Venkatachalam e Cheralathan (2019).	69

Figura 2.36	–Curvas do fluxo de radiação solar no plano do foco dos concentradores tipo prato parabólico com $f = 1$ e $\phi_r = 45^\circ$ e 60° de (a) Shuai, Xia e Tan (2008) e (b) Reddy, Natarajan e Veershetty (2015).	76
Figura 2.37	–Variação teórica do fluxo de radiação incidente na zona focal de (a) Shuai, Xia e Tan (2008) e (b) Reddy, Natarajan e Veershetty (2015). (Adaptado)	77
Figura 2.38	–Curva do fluxo focal de um concentrador tipo prato parabólico com receptor (JETER, 1986) (Adaptado).	78
Figura 2.39	–Perfil de emissão de radiação do disco solar: (a) perfil gaussiano de Harris e Duff (1981) e (b) perfis de Sol quadrado (difuso), real e empírico de Johnston (1998).	79
Figura 2.40	–Perfil de emissão de radiação do disco e aureola solar (NEUMANN et al., 2002).	81
Figura 2.41	–Distribuição do fluxo de energia no foco do concentrador solar medido por (a) Ries e Schubnell (1990), em agosto, e (b) Steinfeld e Schubnell (1993), em outubro. (Adaptado)	83
Figura 2.42	–Imagens dos focos dos concentradores paraboloidais de (a) Johnston (1995a), e (b) Johnston (1998). (Adaptado)	84
Figura 2.43	–Simulador solar (a) e imagem registrada na zona focal (b). (Adaptado de Levêque et al. (2016))	85
Figura 2.44	–Esquerda: esquema do layout do concentrador solar com helióstato. Direita: Estrutura do alvo lambertiano para as medições (Adaptado de Ballestrín et al. (2019))	86
Figura 2.45	–Imagem focal dos concentradores de (a) Ballestrín et al. (2019), e (b) Bode, Gauche e Landman (2012). (Adaptado)	87
Figura 2.46	–Sistema de medição direta por varredura e pelo alvo lambertiano de Ballestrín e Monterreal (2004).	88
Figura 2.47	–(a) Concentrador solar com membranas evacuadas e (b) alvo lambertiano resfriado. (Adaptado de Schmitz et al. (2017))	89
Figura 2.48	–Concentradores tipo prato parabólico da Plataforma Solar de Almería. DISTAL II (à esquerda) e EURODISH (à direita) (ALMERÍA, 2019).	89
Figura 2.49	–Imagens focais do concentrador Distal II (a) no plano focal e (b) em plano paralelo, e do concentrador Eurodish (c) no plano focal e (d) em plano paralelo ao da zona focal. Adaptado de Ulmer et al. (2002).	90
Figura 2.50	–(a) Perfil de fluxo de energia em dois eixos e (b) fotografia da imagem focal do concentrador de Lovegrove, Burgess e Pye (2011).	91
Figura 2.51	–(a) Concentrador solar do tipo prato parabólico e (b) equipamentos da zona focal (alvo lambertiano, câmera, reatores e calorímetro. Dähler et al. (2018).	92

Figura 3.1	– Paraboloide com a superfície do refletor Scheffler em destaque.	97
Figura 3.2	– Esquema da cozinha solar do trabalho de Oelher e Scheffler (1994) com o concentradores sobrepostos.	99
Figura 3.3	– Parábola representativa com dois concentradores Scheffler no mesmo foco. Dib e Fiorelli (2015a).	100
Figura 3.4	– Vista superior (no plano xz), do concentrador Scheffler. Dib e Fiorelli (2015a).	101
Figura 3.5	– Variações no perfil da parábola devido ao sistema de rastreamento sazonal para o Scheffler Norte e o Scheffler Sul nos solstícios e no equinócio (DIB; FIORELLI, 2015a).	104
Figura 3.6	– Movimento do plano da imagem do foco em relação ao plano xy . (DIB; FIORELLI, 2015a).	105
Figura 3.7	– Comparação entre as variações da área de abertura entre os concentradores Scheffler Norte (SN) e Scheffler Sul (SS) conforme a declinação solar (δ). (DIB; FIORELLI, 2015a).	106
Figura 4.1	– Esquema de reflexão cônica na formação de imagem do concentrador solar Scheffler. Dib e Fiorelli (2015a).	108
Figura 4.2	– Esquema de reflexão cônica na formação de imagem do concentrador solar Scheffler. Dib e Fiorelli (2015a).	108
Figura 4.3	– Geometria para modelagem (a) de w_a , w_y e w_z , (b) e (c) do eixo menor da imagem, w_b	109
Figura 4.4	– Geometria de referência para modelagem do perfil de fluxo de energia do foco.	112
Figura 5.1	– Fotografia da bancada experimental.	117
Figura 5.2	– Diagrama de sombra do local de instalação do concentrador solar Scheffler.	117
Figura 5.3	– Vistas lateral e traseira do concentrador solar.	118
Figura 5.4	– Mecanismo do sistema de rastreamento diário.	119
Figura 5.5	– Superfície do alvo lambertiano antes (a) e depois (b) do tratamento superficial.	121
Figura 5.6	– Teste de homogeneidade entre as superfícies do alvo lambertiano (a) antes, com desvio padrão de 9,3 (16,4%) e (b) depois do tratamento com desvio padrão de 3,0 (1,5%).	122
Figura 5.7	– Luminancímetro KONICA MINOLTA e modelo LS-110.	122
Figura 5.8	– Curva do teste de luminância.	123
Figura 5.9	– Câmera com sensor CMOS, lente $f=1$, 3 filtros 0,9OD e 1 filtro 2,6OD regulável.	124
Figura 5.10	– Esquema do posicionamento da câmera CMOS em vista lateral e superior.	125

Figura 5.11	–Pireliômetro EPPLEY modelo NIP.	127
Figura 6.1	– Variação das dimensões máximas da imagem.	134
Figura 6.2	– Variação das dimensões mínimas da imagem.	136
Figura 6.3	– Fronteira e núcleo da imagem focal com $\theta_c = 4,65$ mrad nos equinócios $n = 80$ e $n = 267$, solstício de câncer $n = 172$, e solstício de capricórnio $n = 355$	136
Figura 6.4	– Variação das dimensões máximas da fronteira da imagem em função da abertura do cone de reflexão.	137
Figura 6.5	– Variação das dimensões máximas da fronteira da imagem em função da área de abertura.	138
Figura 6.6	– Variação das dimensões máximas do núcleo da imagem em função da abertura do cone de reflexão.	138
Figura 6.7	– Variação das dimensões máximas do núcleo da imagem em função da abertura da área de abertura.	139
Figura 6.8	– Curvas das variações da área de abertura dos concentradores Scheffler Norte (CSN) e Scheffler Sul (CSS) com deformação ideal da borda da estrutura do refletor.	140
Figura 6.9	– Curvas das variações da área de abertura dos concentradores Scheffler Norte (CSN) e Scheffler Sul (CSS) com estrutura do refletor rígida.	140
Figura 6.10	–Esquema com dois concentradores Scheffler no mesmo foco na parábola. (DIB; FIORELLI, 2015a; DIB; FIORELLI, 2015b).	141
Figura 6.11	–Resultados de simulação da variação da razão de concentração do Scheffler Sul para ângulos de desvios, ou imperfeições, no refletor, que variam de 0° a 2° . (DIB; FIORELLI, 2015b).	142
Figura 6.12	–Resultados de simulação da variação da razão de concentração do Scheffler Sul para ângulos de desvios, ou imperfeições, no refletor, que variam de 0° a 2° . (DIB; FIORELLI, 2015b).	143
Figura 6.13	–Equinócios, $n=80$ e 267 . Perfil de Sol $4,65$ mrad + auréola = 30 mrad. Marcações para $\theta_s = 4,65$ mrad + $\theta_m = 12,5$ mrad.	144
Figura 6.14	–Solstício de Câncer, $n=173$. Perfil de Sol $4,65$ mrad + auréola = 30 mrad. Marcação para $\theta_s = 4,65$ mrad + $\theta_m = 12,5$ mrad.	145
Figura 6.15	–Solstício de Capricórnio, $n=355$. Perfil de Sol $4,65$ mrad + auréola = 30 mrad. Marcação para $\theta_s = 4,65$ mrad + $\theta_m = 12,5$ mrad.	146
Figura 6.16	–Perfil teórico da imagem nos Equinócios, $n = 80$ ou 267 , com ângulo do cone ótico do espelho de $12,5$ mrad.	147
Figura 6.17	–Perfil teórico da imagem no Solstício de Câncer, com ângulo do cone ótico do espelho de $12,5$ mrad.	148
Figura 6.18	–Perfil teórico da imagem no Solstício de Capricórnio, com ângulo do cone ótico do espelho de $12,5$ mrad.	148

Figura 6.19	–Curva do fluxo de radiação solar concentrada nas regiões laterais (sobre eixo z) e superior (sobre eixo y acima do ponto F) da fronteira do foco nos Equinócios.	149
Figura 6.20	–Curva do fluxo de radiação solar concentrada nas regiões laterais (sobre eixo z) e inferior (sobre eixo y abaixo do ponto F) da fronteira do foco nos Equinócios.	149
Figura 6.21	–Curva do fluxo de radiação solar concentrada nas regiões laterais (sobre eixo z) e superior (sobre eixo y acima do ponto F) da fronteira do foco no Solstício de Câncer.	150
Figura 6.22	–Curva do fluxo de radiação solar concentrada nas regiões laterais (sobre eixo z) e inferior (sobre eixo y abaixo do ponto F) da fronteira do foco no Solstício de Câncer.	150
Figura 6.23	–Curva do fluxo de radiação solar concentrada nas regiões laterais (sobre eixo z) e superior (sobre eixo y acima do ponto F) da fronteira do foco no Solstício de Capricórnio.	151
Figura 6.24	–Curva do fluxo de radiação solar concentrada nas regiões laterais (sobre eixo z) e inferior (sobre eixo y abaixo do ponto F) da fronteira do foco no Solstício de Capricórnio.	151
Figura 6.25	–Fotografia original para os quatro dias de medições, Q1 N2 K3 e N4 em 16 bit.	152
Figura 6.26	–Resultado de combinação linear realizado nos registros originais de cada imagem como matriz dos valores da escala de cinza.	152
Figura 6.27	–Processamento das imagens com o comando entropyfilt	154
Figura 6.28	–Máscara para isolar cada imagem focal em Q1, N2, K3 e N4.	154
Figura 6.29	–Discretizações binárias para determinar o centroide de cada imagem focal	156
Figura 6.30	–Linhas de referência para encontrar o ponto de fuga, tracejadas em lilás, e linhas dos eixos da imagem focal, traço pontilhadas em verde.	156
Figura 6.31	–Superfície do fluxo de energia em todo o foco do concentrador solar Scheffler nas respectivas datas após da aplicação da máscara para eliminar informações da vizinhança.	158
Figura 6.32	–Superfície do fluxo de energia no núcleo do foco após aplicação das máscaras com diâmetro de $w_{y,min}$, com $\theta_c = 47,5$ mrad.	160
Figura 6.33	–Superfície do fluxo de energia no núcleo do foco após aplicação das máscaras com diâmetro de $w_{z,min}$, com $\theta_c = 47,5$ mrad.	161
Figura 6.34	–Superfície do fluxo de energia no núcleo do foco após aplicação das máscaras com diâmetro de $w_{y,max}$, com $\theta_c = 47,5$ mrad.	164
Figura 6.35	–Superfície do fluxo de energia no núcleo do foco após aplicação das máscaras com diâmetro de $w_{z,max}$, com $\theta_c = 47,5$ mrad.	165

Figura 6.36	Variação dos diâmetros de diferentes intercepções nas quatro imagens do foco do concentrador solar Scheffler Sul.	166
Figura 6.37	Fluxo de energia nas imagens Q1, N2, K3 e N4 e nas intercepções para as curvas de área de aberturas <i>a</i> e <i>b</i>	166
Figura 6.38	Comparação do fluxo de radiação solar concentrada em diferentes intercepções com a irradiância normalizada em $DNI = 1000$ para as imagens Q1, N2, K3 e N4 e as áreas de aberturas das curvas <i>a</i> e <i>b</i> . . .	168
Figura 6.39	Curvas do fluxo de radiação solar com a irradiância normalizada em $DNI = 1000 \text{ W/m}^2$ e as áreas de aberturas das curvas <i>a</i> e <i>b</i> , para diâmetros das imagens Q1 e N4 fixados em todas as imagens de foco.	169
Figura A.1	Teste de luminância em amostra sob céu nublado.	179
Figura C.1	Imagens de Janeiro.	183
Figura C.2	Imagens de Fevereiro.	184
Figura C.3	Imagens de Março.	184
Figura C.4	Imagens de Abril.	185
Figura C.5	Imagens de Maio.	185
Figura C.6	Imagens de Junho.	186
Figura C.7	Imagens de Julho.	186
Figura C.8	Imagens de Agosto.	187
Figura C.9	Imagens de Setembro.	187
Figura C.10	Imagens de Outubro.	188
Figura C.11	Imagens de Novembro.	188
Figura C.12	Imagens de Dezembro.	189
Figura C.13	Núcleo de Janeiro.	189
Figura C.14	Núcleo de Fevereiro.	190
Figura C.15	Núcleo de Março.	190
Figura C.16	Núcleo de Abril.	191
Figura C.17	Núcleo de Maio.	191
Figura C.18	Núcleo de Junho.	192
Figura C.19	Núcleo de Julho.	192
Figura C.20	Núcleo de Agosto.	193
Figura C.21	Núcleo de Setembro.	193
Figura C.22	Núcleo de Outubro.	194
Figura C.23	Núcleo de Novembro.	194
Figura C.24	Núcleo de Dezembro.	195
Figura C.25	Janeiro	195
Figura C.26	Fevereiro	195
Figura C.27	Março	196
Figura C.28	Abril	196

Figura C.29–Maio	196
Figura C.30–Junho	196
Figura C.31–Julho	197
Figura C.32–Agosto	197
Figura C.33–Setembro	197
Figura C.34–Outubro	197
Figura C.35–Novembro	198
Figura C.36–Dezembro	198
Figura B.1 – Estrutura do espelho de alumínio anodizado. Fonte: Alanod-Solar (2010).	203
Figura B.2 – Reflexão no espectro total da radiação solar. Fonte: Alanod-Solar (2014).	204
Figura B.3 – Reflexão no espectro visível da radiação solar. Fonte: Alanod-Solar (2014).	204

LISTA DE TABELAS

Tabela	1.1 – Custo de geração de energia elétrica em algumas formas de conversão de energia. Vannoni et al. (2008).	31
Tabela	2.1 – Perda diária de umidade do pão do experimento de Santos et al. (2016).	58
Tabela	2.2 – Comparação entre coletor solar concentrador simétrico e Scheffler com receptor com motor Stirling (RUELAS; VELÁZQUEZ; CERESO, 2013).	65
Tabela	2.3 – Aplicações dos concentradores solares Schefflers revisados	72
Tabela	2.4 – Dados térmicos e óticos dos concentradores solares tipo Scheffler.	74
Tabela	2.5 – Representação de CSR para faixas de proporção de auréola medidas. (NEUMANN et al., 2002).	80
Tabela	2.6 – Tipo de concentrador solar e de alvo lambertiano utilizados para medições de imagem	95
Tabela	2.7 – Câmeras utilizadas nas medições de imagem de concentradores solares	96
Tabela	5.1 – Dias considerados para a simulação da formação de imagem.	116
Tabela	5.2 – Instrumentos utilizados e as incertezas.	128
Tabela	5.3 – Fontes de incerteza de medições dimensionais.	131
Tabela	5.4 – Fontes de incerteza de medições de fluxo de energia em todos os pixels.	132
Tabela	6.1 – Valores dos semi eixos (ou raios) das variáveis dimensionais mínimas da imagem focal para o concentrador solar Scheffler Sul (CSS) para $\theta_c = 12,5$ mrad.	153
Tabela	6.2 – Valores dos semi eixos (ou raios) das variáveis dimensionais máximas da imagem focal para o concentrador solar Scheffler Sul (CSS) para $\theta_c = 12,5$ mrad.	155
Tabela	6.3 – Valores dos semi eixos (ou raios) das variáveis dimensionais do feixe refletido no ponto A da imagem focal para o concentrador solar Scheffler Sul (CSS) para $\theta_c = 12,5$ mrad.	157
Tabela	6.4 – Dimensões dos semieixos para as quatro imagens com $\theta_c = 47,5$ mrad e incertezas (em mm).	159
Tabela	6.5 – Parâmetros de referência de cálculo e posicionamento para cada registro de imagem.	160
Tabela	6.6 – Resultado dos fluxos de radiação solar total e segmentado no foco do concentrador solar Scheffler Sul para curva de variação de A_a mais intensa (curva a).	162
Tabela	6.7 – Resultado dos fluxos de radiação solar total e segmentado no foco do concentrador solar Scheffler Sul para curva de variação de A_a menos intensa (curva b).	163

Tabela	A.1–Ensaio de luminância de amostrar de chapa de aço com dois diferentes tratamentos na superfície.	180
Tabela	B.1–Ajustes da câmera FLIR no software SpinView.	182
Tabela	A.1–Ocorrência de CSR nas respectivas faixas de incidência solar direta no plano perpendicular (DNI) (NEUMANN et al., 2002).	200
Tabela	A.2–Perfil da emissão de radiação do disco e da auréola solar (I_r) com $\theta_s = 30$ mrad (NEUMANN et al., 2002).	201
Tabela	B.1–Resultados de análises ópticas, segundo Alanod-Solar (2010).	205
Tabela	B.2–Características físico-químicas do espelho MIRO-SUN® weather-proof reflective 90 . Alanod-Solar (2014).	206

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CSN	Scheffler Norte
CSS	Scheffler Sul
MCRT	Monte Carlo Ray Tracing
OD	<i>Optical Density</i>
WI	Receptor com isolamento no absorvedor externo
WOI	Receptor sem isolamento no absorvedor externo

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLOS GREGOS

α	Absortividade [-];
α_f	Absortividade na zona focal [-];
α_{ef}	Absortividade efetiva da cavidade [-];
α_s	Inclinação entre o semieixo maior do refletor Scheffler e a diretriz da parábola [°];
α_s	Altura solar [°];
β	Inclinação do receptor em relação à horizontal [°];
γ	Fator de interceptação [-];
γ_{NORTE}	Azimute solar em relação ao Norte [°];
δ	Declinação solar [°];
δ_t	Desvio padrão total [-];
δ_c	Desvio padrão devido à fatores construtivos do concentrador solar [-];
δ_s	Desvio padrão devido ao sensor do motor [-];
δ_m	Desvio padrão devido ao espelho do concentrador solar [-];
δ_{mO}	Desvio padrão devido ao motor do sistema de rastreamento [-];
δ_l	Desvio padrão devido ao alinhamento entre o concentrador solar e o receptor [-];
ϵ_f	Emissividade na zona focal [-];
ζ	Fator de área útil do concentrador solar [-];
η_t	Eficiência térmica [-];
θ'	Meio ângulo diferencial do cone ótico [°];
θ_c	Meio ângulo do cone ótico total do concentrador [°];

θ_m	Meio ângulo do cone ótico do espelho do refletor solar [°];
θ_s	Meio ângulo do cone ótico do disco solar [°];
θ'_s	Meio ângulo diferencial do cone ótico do disco solar [°];
ρ_m	Refletividade do espelho do concentrador solar [-];
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [W/m ² K ⁴];
ϕ	Ângulo de borda. Para o concentrador Scheffler, é o ângulo entre o eixo do sistema de rastreamento e um ponto (subscrito) na borda do refletor, denominado no subscrito por r , ou pela letra de um ponto (A, B, M ou outra), [°];
φ	Ângulo entre um ponto do refletor e o eixo do sistema de rastreamento diário. Ângulo máximo para φ é φ_r , de modo que $\varphi_r = \phi_r$, [°];
χ	Ângulo entre as linhas do foco F a algum ponto do refletor e do foco F ao vértice [°];
χ_{eixo}	Ângulo entre o eixo da parábola referente ao concentrador Scheffler no plano cartesiano xy , e o eixo do sistema de rastreamento diário, [°];
ω	Ângulo do horário solar [°].

SÍMBOLOS LATINOS

A	Extremidade do refletor Scheffler mais próxima do ponto F [m];
A_a	Área de abertura real do concentrador solar [m ²];
$A_{abs,ext}$	Área do absorvedor externo [m ²];
A_{ap}	Área de abertura nominal do concentrador solar [m ²];
A_{cav}	Área da parede da cavidade [m ²];
A_e	Área do refletor sem espelhos [m ²];
A_f	Área do foco do concentrador solar [m ²];
A_o	Área do orifício, ou janela da cavidade [m ²];
A_r	Área do receptor [m ²];
A_s	Área elíptica do refletor Scheffler [m ²];

B	Ângulo do dia em relação à translação, com 0° no primeiro dia do ano [$^\circ$];
B	Extremidade do refletor Scheffler mais distante do ponto F [m];
b_s	Semieixo maior da borda elíptica do refletor Scheffler [m];
C	Ponto do pivô do sistema de rastreamento sazonal do concentrador solar Scheffler [m];
C_n	Razão de concentração geométrica no dia n [-];
C_p	Calor específico a pressão constante [J/(kg°C)];
d_{ap}	Diâmetro de abertura nominal [m];
d_{cav}	Diâmetro interno da cavidade [m];
d_o	Diâmetro do orifício, ou da anela de abertura de um receptor em cavidade [m];
d_s	Diâmetro de abertura do refletor Scheffler ou semieixo menor da borda elíptica do refletor Scheffler [m];
E_p	Energia do processo [J];
Ex_e	Exergia de entrada [J];
Ex_u	Exergia útil [J];
f	Distância entre o foco e o vértice da parábola [m];
F	Foco teórico da parábola ou parabolóide [m];
fe	Feixe [m];
fe'	Complemento de reta diferencial entre o ponto F e o centro da base circular do cone ótico refletido e colinear com fe . [m];
F_{cinza}	Fator de cinza. Relaciona o fluxo de energia, em W ou J, com o valor da escala de cinza do pixel, de 0 (preto) a 2^{16} (branco) [1/W];
F_y	Eixo y no plano do foco [m];
F_z	Eixo z no plano do foco [m];
$F'U_L$	Fator de perdas de calor [W/ m ² °C];
$F'\eta_o$	Fator de eficiência ótica [-];

G_b	Irradiância solar direta [W/m ²];
G_{bT}	Irradiância solar direta no plano de abertura do concentrador solar [W/m ²];
G_{fe}	Fluxo de radiação solar total em um cone ótico refletido [W];
G_p	Fluxo total de energia em um ponto da zona focal [W];
g_p	Fluxo de energia em um ponto da zona focal de um cone ótico refletido [W];
Gr	Número de Grashoff [-];
h_{for}	Coefficiente de convecção forçada [W/m ² °C];
h_{nat}	Coefficiente de convecção natural [W/m ² °C];
I_{CSR}	Irradiação solar direta emitida pela auréola solar [W/m ²];
I_b	Irradiação solar direta [W/m ²];
\bar{I}_r	Intensidade de radiação solar relativa média normalizada [W/m ²];
I_bT	Irradiação solar direta no plano inclinado [W/m ²];
k_{iso}	Coefficiente de condução no isolante térmico [W/m°C];
L_{ap}	Comprimento do perfil da parábola do ponto A ao ponto P [m];
L_{pb}	Comprimento do perfil da parábola do ponto B ao ponto P [m];
m	Massa [kg];
M	Ponto médio entre A e B sobre a borda do refletor Scheffler no plano xy [m];
n	Dia do ano [dia];
n_{fe}	Número de feixes [-];
n_s	Número de concentradores Scheffler no sistema [-];
Nu	Número de Nusselt [-];
P	Ponto na curva da parábola onde a tangente é 45° [m];
P_n	Pressão no ponto n [Pa];
Q_{cav}	Calor transferido para a cavidade [J];

$Q_{cond,conv}$	Calor transferido por condução e convecção [J];
$Q_{conv,for}$	Calor transferido por convecção forçada [J];
$Q_{conv,nat}$	Calor transferido por convecção natural [J];
Q_{el}	Calor transferido de fonte elétrica [J];
Q_{flow}	Calor transferido para o fluido térmico [J];
Q_{Sol}	Calor transferido da energia solar para o sistema [J];
Q_u	Calor útil transferido para o fluido de trabalho [J];
$Q_{rad,emi}$	Calor transferido por emissão de radiação térmica [J];
$Q_{rad,ref}$	Calor transferido por reflexão de radiação térmica [J];
Q_{rec}	Calor transferido para o receptor [J];
r_{di}	Raio da base circular de um cone ótico refletido de eixo fe [m];
r_{dis}	Raio da base circular do cone ótico refletido de eixo $fe + fe'$ [m];
s	Reta complementar entre o centro da base circular do cone ótico refletido e o centro da corda com dimensão w_b [m];
t	Tempo [s];
t_o	Constante de tempo [1/s];
T_{cav}	Temperatura da cavidade [°C];
T_e	Temperatura na entrada [°C];
T_n	Temperatura em um ponto n [°C];
T_{abs}	Temperatura do absorvedor [°C];
T_s	Temperatura na saída [°C];
T_{sol}	Temperatura do Sol [°C];
T_{∞}	Temperatura do ambiente [°C];
t_p	Tempo de processo [s];
V_{cinza}	Valor na escala de cinza do pixel [-];
w_a	Eixo maior da projeção de um feixe [m];

w_a'	Distância entre o ponto F e o ponto que junta w_{a1} e w_{a2} [m];
w_{a1}	Segmento maior do eixo w_a [m];
w_{a2}	Segmento menor do eixo w_a [m];
w_b	Eixo menor da projeção de um feixe [m];
w_y	Largura da imagem do foco no eixo F_y [m];
w_{y1}	Semieixo vertical superior da imagem do foco [m];
w_{y2}	Semieixo vertical inferior da imagem do foco [m];
w_z	Largura da imagem do foco no eixo F_z [m];
x_{fe}	Coordenada x do vértice do cone ótico refletido [m];
y_{fe}	Coordenada y do vértice do cone ótico refletido [m];
w_{z1}	Semieixo da imagem do foco no eixo F_z [m];
w_{z2}	Semieixo da imagem do foco no eixo F_z [m];
z_{fe}	Coordenada z do vértice do cone ótico refletido [m];

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	28
1.1	Concentrador solar de foco fixo	32
1.2	Objetivos	33
1.3	Estrutura do trabalho	34
2	CONCENTRADORES SOLARES	36
2.1	Estado da arte e aplicações	37
2.2	Tabela comparativa entre os trabalhos realizados	70
2.3	Perfil de fluxo de energia na zona focal	75
2.4	Medições da imagem focal	82
2.4.1	Medição direta com barra móvel	93
2.4.2	Medição indireta com absorvedor exposto	93
2.4.3	Medição com alvo lambertiano estacionário	94
3	A GEOMETRIA DO CONCENTRADOR SOLAR SCHEFFLER	97
3.1	Dimensionamento do concentrador solar Scheffler	99
3.2	Efeito do sistema de rastreamento sobre a geometria do concentrador Scheffler	103
4	A FORMAÇÃO DE IMAGEM	107
4.1	Perfil do fluxo de energia na imagem	111
5	MATERIAIS E MÉTODOS	115
5.1	Simulação	115
5.2	Bancada experimental	116
5.2.1	O concentrador solar	118
5.2.2	Alvo Lambertiano	121
5.2.3	Câmera CMOS	123
5.2.3.1	Relação entre escala de cinza do pixel e o fluxo de energia	125
5.2.4	Incertezas das medições	128
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	133
6.1	Variações dimensionais da imagem	134
6.2	Varição sazonal da curva teórica do fluxo de energia da imagem	141
6.3	As medições da imagem focal	145
	Conclusão	172

REFERÊNCIAS	173
APÊNDICES	178
APÊNDICE A – TESTE EM AMOSTRAS DE TRATAMENTO SUPERFICIAL PARA O ALVO LAMBERTIANO . . .	179
APÊNDICE B – AJUSTES DA CÂMERA FLIR BLACKFLY® S . . .	181
APÊNDICE C – RESULTADOS TEÓRICOS PARA OS FLUXOS DE ENERGIA NA IMAGEM FOCAL DO CONCENTRADOR SOLAR SCHEFFLER	183
ANEXOS	199
ANEXO A – PERFIL MÉDIO DE EMISSÃO DE RADIAÇÃO A PARTIR DO DISCO SOLAR	200
ANEXO B – INFORMAÇÕES DO ESPELHO DA ALANOD	203

1 INTRODUÇÃO

Um dos fatores primordiais para que as nações se desenvolvam, especialmente as mais pobres, é a disponibilidade de energia para atender à crescente demanda nas suas diversas formas: energia mecânica, elétrica, térmica, e outras. A energia na forma térmica é amplamente utilizada, porém a maior parte da energia disponível para o consumidor final é elétrica, e uma parcela desta é convertida para térmica em processos que são em sua maioria pouco eficientes.

Além disso, grande parte das empresas geradoras de energia elétrica utiliza energia de outras formas até que esteja na forma elétrica disponível ao consumidor final. No entanto, para cada etapa de conversão ou transporte de energia há uma ineficiência. Com a disponibilidade da energia na forma de eletricidade para o consumidor, grande parte deste converte-a novamente para energia térmica, que gera outra etapa com perdas.

A disponibilidade de energia varia segundo as condições naturais e a infraestrutura em cada país. No Brasil, a maior parcela da energia elétrica disponível é gerada por usinas hidrelétricas. Devido à necessidade de desenvolvimento, mais usinas estão sendo projetadas e construídas, desde Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) até obras de grande porte, causando impactos ambientais em diferentes graus. Além disso, se a matriz energética depender principalmente de uma fonte, nesse caso, a hídrica, surge a necessidade de medidas para mitigação de riscos devido à sazonalidade. Em períodos de pouca chuva, as represas de hidrelétricas precisam ser mais bem controladas. Com isso, para suprir a demanda por energia elétrica da matriz brasileira, usinas termelétricas são acionadas, e, conseqüentemente, os custos e as emissões locais de poluentes se elevam.

Dessa forma, um dos aspectos importantes para que o aumento da disponibilidade continue é, além do investimento contínuo na matriz energética, a diversificação das formas de geração de energia para minimizar os riscos sazonais e os custos ao consumidor. Uma alternativa seria variar as formas de transformação de um tipo de energia para energia elétrica, de acordo com a localidade da demanda, e diminuir a dependência do consumidor em relação à matriz energética, que, no Brasil, é centralizada. A demanda de energia é global, porém muitos dos necessitados estão entre os países subdesenvolvidos e em desenvolvimento. Geograficamente, muitas regiões pobres e carentes do planeta estão localizadas onde há maior intensidade de energia solar, e a quantidade de energia disponível para o consumo da população impacta diretamente na qualidade de vida da mesma (OELHER; SCHEFFLER, 1994).

A média anual da incidência de radiação solar direta no plano normal à direção da emissão está apresentada na figura 1.1, retirada do Atlas Brasileiro de Energia Solar

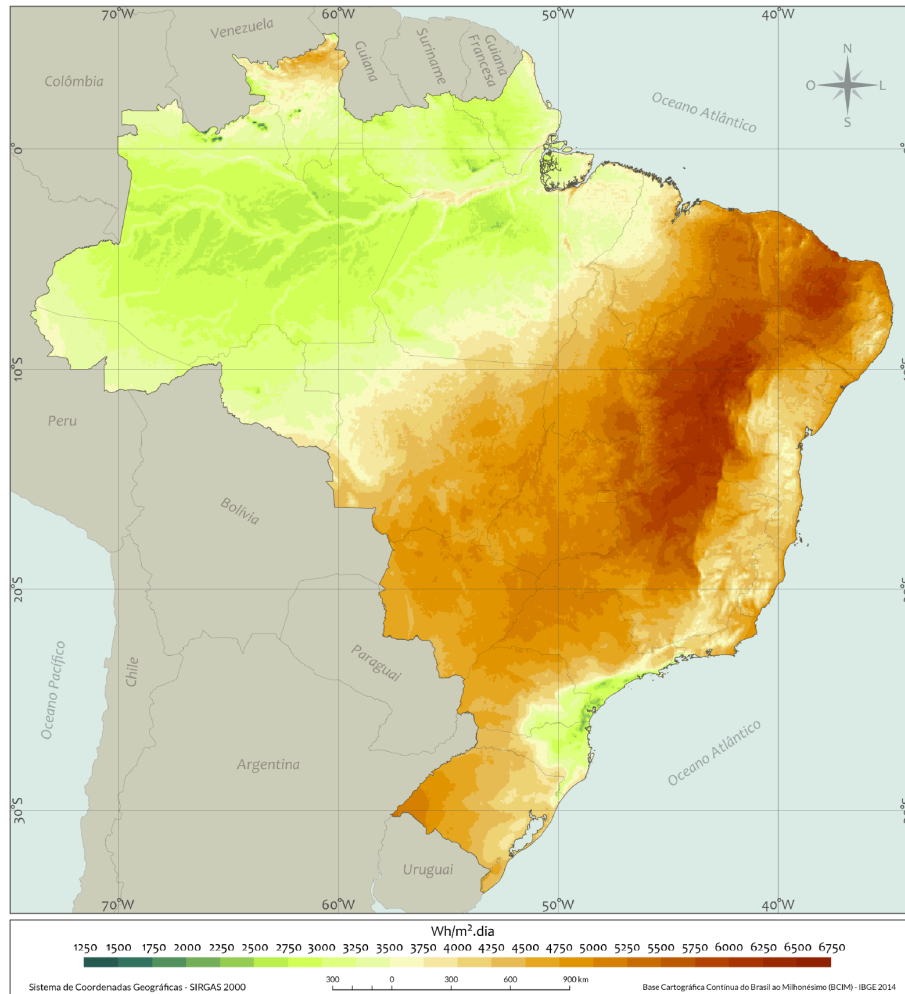


Figura 1.1 – Mapa da radiação solar direta normal média anual do Brasil. Pereira et al. (2017).

(PEREIRA et al., 2017). O mapa de incidência de radiação direta é útil para estudos de utilização de energia solar e, estritamente, também de sistemas com concentradores solares paraboloidais. O Brasil é um dos países com regiões de maior intensidade de irradiação solar no planeta. Considerando somente a radiação extraterrestre, sem os efeitos da atmosfera, o extremo sul do Brasil, região de Chuí, cuja latitude é de $-33^{\circ}45'$, é o local brasileiro com menor intensidade de irradiação solar, mas possui intensidade de irradiação maior que a região mais intensa na Europa, na cidade de Tarifa (Espanha), cuja latitude é de $+36^{\circ}$ e onde existem muitos centros de pesquisa sobre energia solar, além de comercialização de equipamentos e usinas que utilizam energia solar por meio de placas termossolares, placas fotovoltaicas, concentradores solares entre outras formas.

Especificamente, o mapa da figura 1.1 é útil para análise de concentradores com sistema de rastreamento que mantém o plano de abertura do refletor perpendicular aos raios solares. No mês de agosto ocorre o maior pico médio de incidência de radiação solar direta, no plano normal à incidência (figura 1.2, também retirada de Pereira et al. (2017)).

Se parte da energia para suprir a demanda de energia térmica for proveniente da

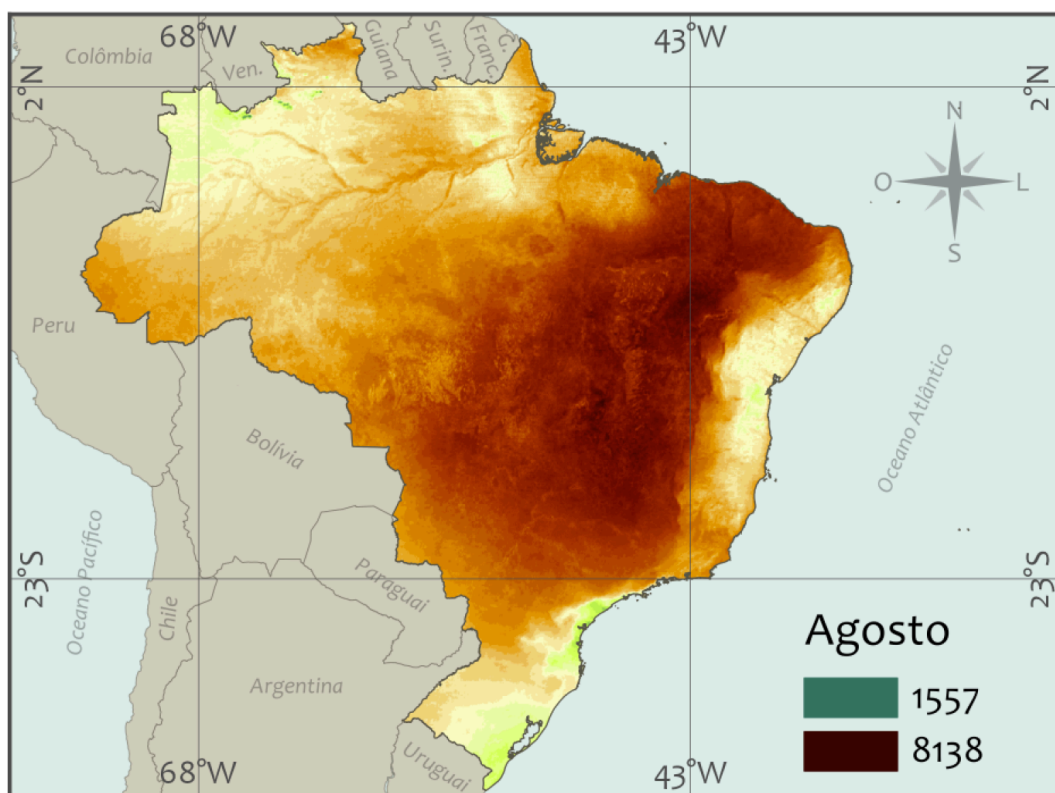


Figura 1.2 – Mapa da radiação solar direta normal média do mês de agosto do Brasil em $\text{Wh/m}^2\cdot\text{dia}$. Pereira et al. (2017).

conversão direta da radiação solar disponível, o aproveitamento pode ser mais eficiente se for considerado o caminho da fonte primária até a forma final da energia, devido ao menor número de conversões no processo, além de melhor custo-benefício em grande parte do globo terrestre.

Dessa forma, o custo efetivo pode ser menor, mesmo em regiões de pouca intensidade de radiação solar no território brasileiro, especialmente em locais isolados da rede de transmissão de energia elétrica. Para a demanda de energia térmica, uma conversão direta da energia solar, por meio de concentradores solares, pode ser mais barata que outras formas de conversão com equipamentos de baixo impacto ambiental, e competitiva com formas de conversão que necessite combustíveis fósseis.

Vannoni et al. (2008) analisaram a demanda térmica industrial da Europa e verificaram que 30% dessa demanda é a temperaturas menores que 100°C como mostra a figura 1.3 para nove setores industriais. Fluidos nessa faixa de temperatura podem ser aquecidos por coletores solares, por exemplo, tipo placas planas, que são amplamente comercializados. Há, ainda, coletores planos de tubo evacuado, que podem suprir demandas de até temperaturas de 120°C .

Como mostra a figura 1.3, 57% do consumo térmico da indústria na Europa é a baixas e médias temperaturas. Esta parcela pode ser atendida diretamente pela conversão

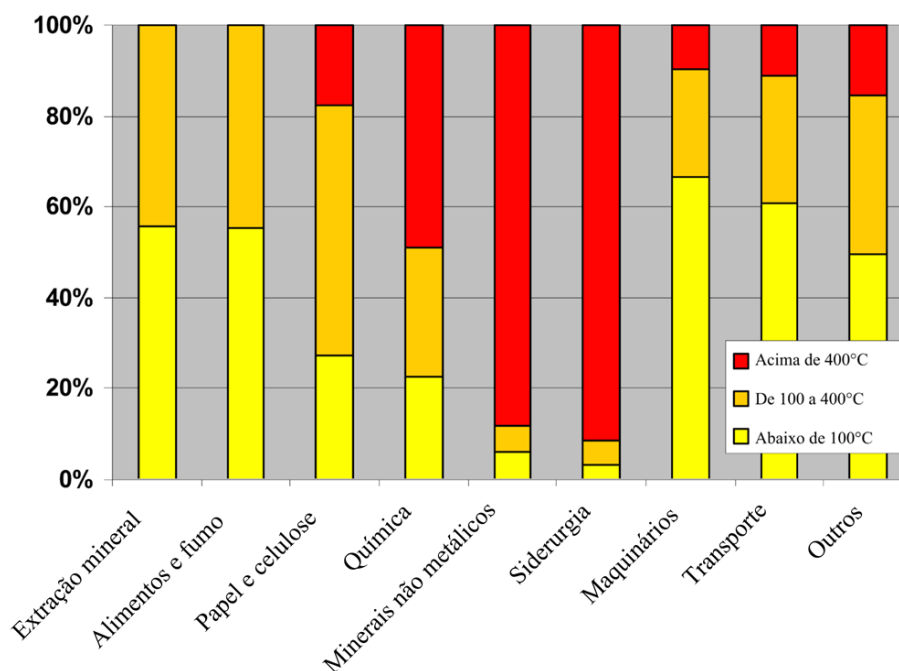


Figura 1.3 – Consumo de energia em faixa de temperatura de alguns setores industriais. Dados do ano de 2003, segundo Vannoni et al. (2008).

da energia solar em térmica por coletores solares concentradores, inclusive o modelo estudado neste trabalho. Dessa forma, pode haver menores perdas de energia na totalidade dos processos de conversão desta desde a fonte primária (Sol) até o consumo final (calor), que pode ser em processos industriais com aquecimento de fluido térmico.

A utilização de coletores solares concentradores para geração de vapor é válida também para geração de energia elétrica, em centrais térmicas solares, por exemplo. A tabela 1.1, mostra o custo aproximado em R\$/MWh de diferentes formas de centrais de geração de energia elétrica. Segundo Vannoni et al. (2008), centrais térmicas solares teriam um custo aproximado de R\$ 100,00 por MWh gerado, sendo altamente competitivo com centrais hidroelétricas.

Tabela 1.1 – Custo de geração de energia elétrica em algumas formas de conversão de energia. Vannoni et al. (2008).

Forma de conversão de energia	R\$ / MWh
Hidroelétrica	100
Gás	300
Óleo combustível	700
Óleo Diesel	1.000

Esta última possui o viés do impacto ambiental pelo alagamento de grandes áreas, que é em função do relevo, para alcançar a profundidade necessária e a pressão necessária para conversão dessa energia em cinética nas turbinas da barragem, enquanto que concentradores solares convertem a radiação solar em energia térmica diretamente

para o fluido que é enviado à turbina de vapor, sem a necessidade de espaço além do campo de concentradores solares e dos equipamentos da central de geração de energia elétrica.

Um dos gargalos para o desenvolvimento do Brasil é a estrutura para geração e distribuição de energia. O procedimento para a construção de termoeletricas necessita de menos tempo do que hidroelétricas. Visando a demanda, as termoeletricas têm vantagem para um suposto suprimento urgente de energia. Porém, sendo alimentadas por combustíveis fósseis ou biomassa, liberam poluentes químicos e térmicos. Observado os efeitos das centrais termoeletricas e hidroelétricas, bem como a disponibilidade de radiação solar no território brasileiro, a oportunidade para investimentos em centrais solares é evidente.

As centrais termosolares para geração de energia térmica ou elétrica podem utilizar diferentes tipos de coletores solares, conforme o porte do projeto. E para demandas na faixas de 100°C ou mais, existem diferentes tipos de coletores concentradores que atendem essas necessidades. Os concentradores podem ser divididos em dois grandes grupos: concentradores formadores de imagem e concentradores não formadores de imagem.

Entre o grupo dos concentradores formadores de imagem há concentradores bidimensionais, que são os formadores de imagem linear, e os concentradores tridimensionais, que são formadores de imagem de ponto. A razão de concentração pode variar entre valores próximos de pouco acima de 10 até à ordem de 10^5 (GOSWAMI; KREITH; KREIDER, 2000). Esse valor é proporcional à temperatura verificada no absorvedor. Por outro lado, os concentradores não formadores de imagem possuem a razão de concentração de 1 a 10.

Os concentradores solares funcionam somente com radiação solar direta, e, portanto, necessitam de um sistema de orientação para o Sol. Os cuidados na operação de concentradores solares são principalmente a manutenção da qualidade óptica (devido ao depósito de poeira e ações de intempéries) e manutenção das partes móveis, i.e. do sistema de rastreamento.

1.1 CONCENTRADOR SOLAR DE FOCO FIXO

O concentrador solar de foco fixo a ser construído neste trabalho foi desenvolvido na Alemanha, pelo físico austríaco Wolfgang Scheffler. A geometria deste concentrador solar é formada por uma seção lateral de um paraboloide de tal forma que o vértice do paraboloide não pertença à superfície do refletor, e, devido a seção lateral ser inclinada, a geometria do refletor é elíptica. Desta maneira, o foco se localiza de frente ao concentrador, enquanto que a radiação solar incide por cima do mesmo.

Um efeito dessa característica geométrica é que um receptor para este concentrador não causa sombra sobre a superfície refletiva e a imagem do foco pode ser utilizada em

local coberto, na sombra. Além do mais, para que seja possível a utilização da imagem do foco em um local interno, o concentrador solar desenvolvido por Wolfgang Scheffler possui um sistema de rastreamento que é capaz de manter o foco fixo no local projetado durante o ano todo (SCHEFFLER, 2006b).

Este modelo de concentrador solar é referenciado por muitos autores como concentrador solar tipo Scheffler, ou, simplesmente, concentrador Scheffler (SOLARE-BRUECKE, 2017). A descrição com mais detalhes do concentrador solar Scheffler foi realizada na seção 3.

Na literatura, há importantes trabalhos voltados para as definições da geometria complexa do refletor Scheffler e diversas demonstrações de aplicações. Já a questão da formação da imagem focal do concentrador Scheffler e do fluxo de energia solar foram pouco exploradas. A imagem formada por este tipo de concentrador tende, teoricamente, a um ponto na região focal do paraboloide. O conhecimento sobre a formação de imagem de um concentrador solar é importante para processos de otimização de receptores.

Algumas terminologias deste trabalho foram consideradas como no livro de Duffie e Beckman (2013) a fim de evitar confusões no entendimento do texto. O termo coletor solar concentrador, ou, simplesmente, coletor, é designado para o sistema completo, no qual é constituído pelo concentrador solar e pelo receptor. Concentrador solar é o sistema que dá suporte ao refletor parabólico e ao sistema de rastreamento. Receptor é a parte do sistema que recebe a energia solar concentrada e o fluido térmico frio, é constituído pelo absorvedor, pelo isolamento térmico e pelo sistema de circulação de fluido. O absorvedor é a parte exposta à radiação solar concentrada que tem função de convertê-la em energia térmica.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho visa auxiliar o processo de otimização de receptores pelo conhecimento da curva do fluxo de energia solar concentrada em função do diâmetro da imagem para concentradores Scheffler. Este equipamento pode ser empregado para aquecimento de fluido térmico com ou sem geração de vapor, para geração de energia elétrica por meio de ciclos de Rankine a vapor ou ciclos orgânicos de Rankine em pequena escala. Desta forma, possibilita-se a geração de energia elétrica em menor quantidade do que aquela gerada pelas usinas hidrelétricas e a utilização direta deste tipo de geração de energia pelo consumidor ou por uma comunidade. Este fato favorece a descentralização da energia da matriz energética e propicia o desenvolvimento de novos equipamentos aplicáveis ao modelo de geração distribuída.

Assim, objetivo geral deste trabalho é propor um modelo para a formação da imagem e para a curva do fluxo de energia na imagem focal formada por um concentrador

solar de foco fixo do tipo Scheffler. Os objetivos específicos são:

- Revisar o estado da arte sobre os concentradores solares de foco fixo e os receptores utilizados, e sobre as formas de medição da imagem focal de concentradores solares em geral;
- Modelar as equações que definem a área de abertura do concentrador Scheffler e a formação de sua imagem focal;
- Modelar as equações para as dimensões do núcleo e da fronteira;
- Simular a formação de imagem para os dias médios dos meses, equinócio e solstícios;
- Dimensionar e projetar o concentrador solar de foco fixo e seu sistema de rastreamento;
- Construir o concentrador solar e o sistema de rastreamento;
- Definir e montar o aparato experimental para determinação do núcleo e da fronteira da imagem formada pelo concentrador, incluindo um alvo com propriedade Lambertiana para projeção da imagem focal;
- Realizar a coleta de dados em dias com diferentes declinações solares;
- Analisar a imagem focal pela definição das dimensões de núcleo, fronteira e erros de reflexão;
- Realizar o tratamento dos dados experimentais e validar o modelo desenvolvido.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 2 está dividido em quatro subseções. A primeira apresenta a revisão do estado da arte sobre o concentrador solar tipo Scheffler, acerca das definições da geometria do refletor e de aplicações. A segunda subseção apresenta duas tabelas com os dados disponibilizados nas publicações consideradas na primeira subseção: uma sobre aplicações e outra sobre dados térmicos e óticos. A terceira subseção mostra as curvas de fluxo de energia na zona focal de outros concentradores paraboloidais. A quarta subseção elucida trabalhos de medição dimensional e de fluxo de energia solar concentrada na zona focal de diversos concentradores solares paraboloidais e, também, apresenta tabelas que relaciona técnicas e equipamentos utilizados nas medições.

O capítulo 3 apresenta o modelo do dimensionamento do refletor do concentrador solar Scheffler, na primeira seção, e a segunda seção expõe a modelagem dos efeitos do sistema de rastreamento do concentrador solar Scheffler sobre o refletor sob o ponto de vista

ideal. A quarta seção apresenta equações para a formação da imagem focal do concentrador Scheffler para obtenção da curva teórica do fluxo de energia solar na zona focal com os efeitos provocados pelo sistema de rastreamento. A bancada de testes está exposta no capítulo 5, e os resultados teóricos e experimentais, no capítulo 6.

2 CONCENTRADORES SOLARES

Os concentradores solares podem ser divididos em dois grupos: não formadores de imagem e formadores de imagem. Os primeiros concentram toda a radiação solar em todas as partes do receptor, sem formar uma imagem definida. Nesses, a razão de concentração, isto é, a razão entre a área de abertura e a área do receptor ou da zona focal, geralmente, é abaixo de 10. Já os concentradores formadores de imagem, como o nome diz, formam uma imagem definida no receptor.

Os concentradores podem ser projetados a partir de diferentes perfis geométricos e podem ser refletores ou refratores. Podem também ser cilíndricos com foco em linha, ou circulares com foco em torno de um ponto, enquanto que os receptores podem ser côncavos ou convexos. A Figura 2.1 ilustra seis exemplos, de (a) a (f), de algumas possíveis geometrias para refletores. As geometrias para concentradores não se limitam ao que esta figura ilustra, mas ao limite da imaginação do projetista.

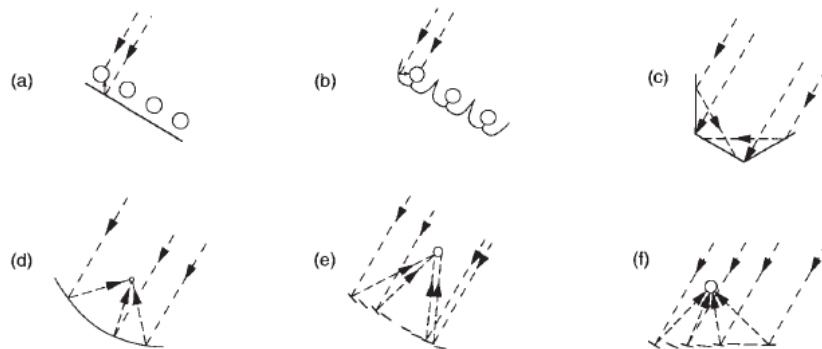


Figura 2.1 – Perfis para coletores solares concentradores (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

O coletor da Figura 2.1 (a) utiliza absorvedores tubulares evacuados com refletor difuso, enquanto que a diferença entre este modelo e o coletor da Figura 2.1 (b) é que o refletor deste último é especular. O absorvedor da Figura 2.1 (c) é plano e unido a um refletor também plano em cada borda. A razão de concentração máxima deste último não alcança 4. O coletor da Figura 2.1 (d) ilustra um perfil que pode pertencer a um concentrador parabólico cilíndrico ou circular, se este for revolucionado. Nesta última configuração, o absorvedor pode ser plano, esférico ou hemisférico, enquanto que na primeira, o absorvedor pode ser plano ou tubular. As duas últimas configurações, Figura 2.1 (e) e (f) são do tipo Fresnel, nas quais são um conjunto de refletores planos que acompanham o movimento do Sol, em relação à Terra, sendo que na Figura 2.1 (e) o movimento é unificado, enquanto que na Figura 2.1 (f) é individualizado.

De acordo com Duffie e Beckman (2013), pode-se considerar que se a razão de concentração for alta, ou seja, se a área da imagem do foco for muito menor que a área de

abertura o refletor, a radiação difusa se torna desprezível, sendo somente aproveitada a radiação solar direta, o que torna necessário acoplar um sistema de rastreamento solar nesse tipo de concentrador.

Os concentradores formadores de imagem linear podem ser movimentados por um sistema acoplado de rastreamento solar por um eixo. Esse eixo pode ser direcionado na posição norte-sul, leste-oeste, ou inclinados e paralelos ao eixo polar. Neste último caso, a velocidade angular transmitida pelo sistema de rastreamento é de $15^\circ/\text{hora}$. Já os concentradores formadores de imagem em torno de um ponto devem ser movimentados em dois eixos, um na vertical e outro na horizontal, com um desses eixos paralelo ao eixo polar da Terra.

O sistema de rastreamento solar pode ser manual ou automático. Os sistemas manuais são aplicáveis aos concentradores de baixa razão de concentração, pois normalmente os concentradores cuja razão de concentração é média ou alta necessitam de precisão. Os concentradores de média e alta razão de concentração necessitam também que as incertezas do sistema de rastreamento automático sejam conhecidas para o correto dimensionamento do receptor.

Segundo Rabl (1976), o limite teórico da razão de concentração em refletores com foco linear obedece a $1/\sin\theta_s$, e em refletores com foco em torno de um ponto obedece a $1/\sin^2\theta_s$. Se considerar que o meio ângulo do cone ótico do disco solar seja $\theta_s \cong 0,27^\circ$, a máxima razão de concentração teórica para concentradores solares dos dois tipos de foco é, aproximadamente, 212 e 45000, respectivamente.

A Figura 2.2 apresenta uma relação entre temperatura do receptor e a razão de concentração (A_a/A_r). A curva do limite inferior é onde as perdas térmicas do receptor são iguais à energia absorvida. A área hachurada corresponde a eficiências térmicas de 40% a 60%. Essa figura também apresenta a faixa de concentração de alguns tipos de refletores.

2.1 ESTADO DA ARTE E APLICAÇÕES

A superfície do concentrador solar Scheffler é paraboloidal. O perímetro do refletor forma um plano elíptico, que é a seção lateral de um parabolóide, de modo que a projeção desta elipse sobre a diretriz da parábola seja circular. A área desta projeção da elipse é a área de abertura do concentrador solar, onde a radiação direta incide ortogonalmente. Desta maneira, o foco da parábola fica localizado à frente da superfície refletiva conforme elucidada a Figura 2.3.

O concentrador solar Scheffler possui um sistema de rastreamento em dois eixos, um para rastreamento azimutal e outro para rastreamento zenital. O sistema de rastreamento azimutal funciona de forma contínua e em sincronia com a movimentação de rotação da

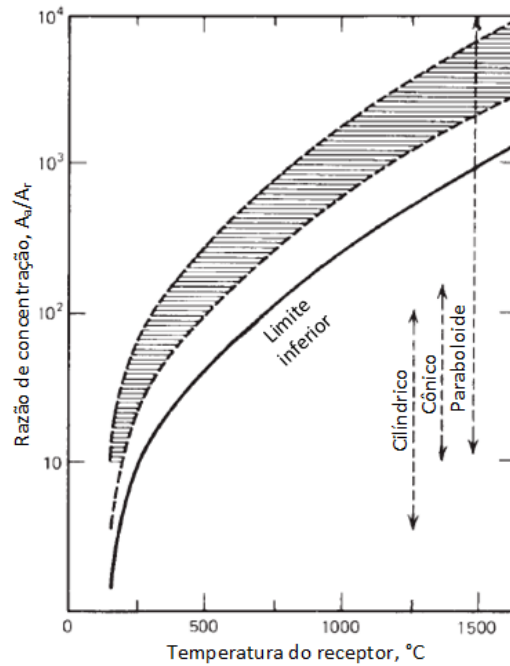


Figura 2.2 – Relação entre razão de concentração e temperatura de receptores (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

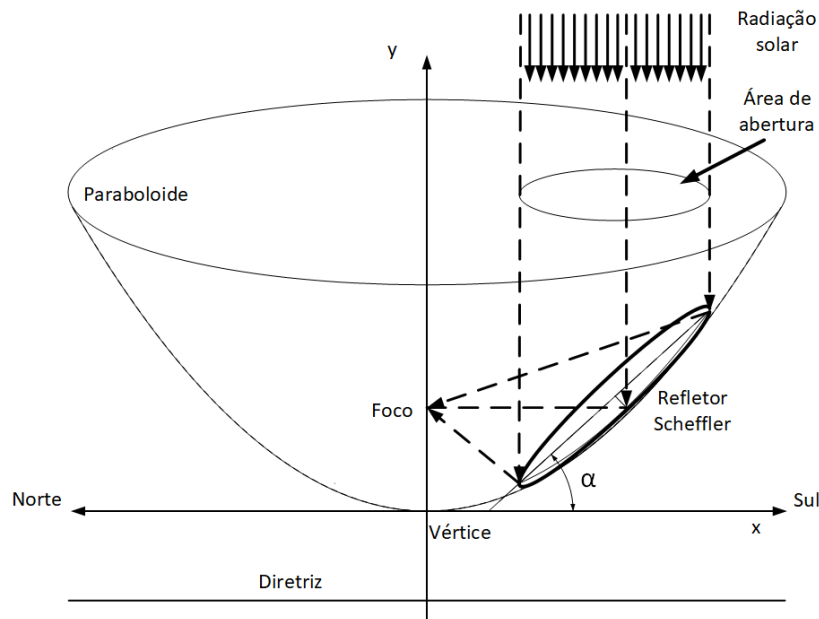


Figura 2.3 – Paraboloide e seção lateral que compõe a superfície do concentrador solar Scheffler.

Terra, e neste trabalho é denominado sistema de rastreamento diário. O eixo do sistema de rastreamento diário deve ser ajustado paralelamente ao eixo polar da Terra para que o movimento com a rotação do planeta seja sincrônico (OELHER; SCHEFFLER, 1994).

Já o sistema de rastreamento zenital, denominado neste trabalho de sistema de rastreamento sazonal, trabalha de forma intermitente, para ajuste das variações da declinação solar em função do movimento de translação da Terra, para garantir que o foco permaneça fixo no local projetado para as diferentes épocas do ano.

Muitos concentradores solares tipo Scheffler foram construídos para equipar cozinhas comunitárias, como mostra a publicação de Oelher e Scheffler (1994), que construíram uma destas cozinhas no Sudão. A área da elipse deste concentrador foi de 7 m^2 . Os autores idealizaram que os materiais utilizados para a construção deste concentrador solar deveriam ser comuns em qualquer região, e que fossem encontrados no local de construção da cozinha. Porém, os espelhos foram feitos de placas metálicas cobertas com filme polimérico refletivo, sendo a única parte do concentrador importada. Mas, em alguns trabalhos, descritos na sequência, foram utilizados espelhos de vidro comum.

O restante dos materiais utilizados para a construção foram perfis de aço carbono, perfis de alumínio. O concentrador solar possuiu um sistema de rastreamento construído com perfis de aço e partes de bicicleta, como roda dentada, catraca e corrente, facilmente encontradas no local. Além dos materiais para construção, segundo os autores, na localidade também deveria ter um técnico de soldagem e os equipamentos para a manufatura do concentrador.

A figura 2.4, que é uma imagem esquemática da cozinha solar construída por Oelher e Scheffler (1994), ilustra uma sobreposição do concentrador nos solstícios de verão e de inverno. A variação na posição do refletor é devido ao sistema de rastreamento sazonal. O caminho dos raios solares incidentes entre os solstícios de verão (em laranja) e inverno (em amarelo) mostra o foco no mesmo alvo projetado.

Nas construções dos concentradores Scheffler, não há conexão física entre o concentrador e o receptor, que pode ficar localizado em um local coberto. Para este trabalho, os autores construíram um refletor secundário, posicionado abaixo do receptor, que refletia a radiação incidente para a base deste receptor, que era um recipiente com capacidade volumétrica foi entre 80 e 100 litros. Esse recipiente foi isolado termicamente e recebeu um tratamento superficial para melhor absorção da radiação solar concentrada. Os autores construíram um sistema híbrido em que pode-se retirar o espelho secundário para realizar o cozimento pela queima de algum combustível sólido.

Pode ser observado, também, que a construção do abrigo para o receptor (a cozinha) deve ser em relação à máxima inclinação da incidência solar em relação à normal do plano horizontal do local, com a finalidade de ser evitadas sombras na área de reflexão do concentrador.

Segundo Oelher e Scheffler (1994), a potência verificada no foco do concentrador solar de foco fixo foi de $2,1 \text{ kW}$ para uma irradiação de 730 W/m^2 . Esta medição foi feita no mês de abril, e a área de abertura do concentrador para o Sol foi de $5,1 \text{ m}^2$. A potência verificada no fogão foi de $1,4 \text{ kW}$. As perdas no refletor secundário foram de 60%. O diâmetro do foco foi de $0,6 \text{ m}$ e a temperatura atingida no foco foi entre 200 e 350°C .

Existem outros modelos de concentradores solares de foco fixo. O modelo de torre

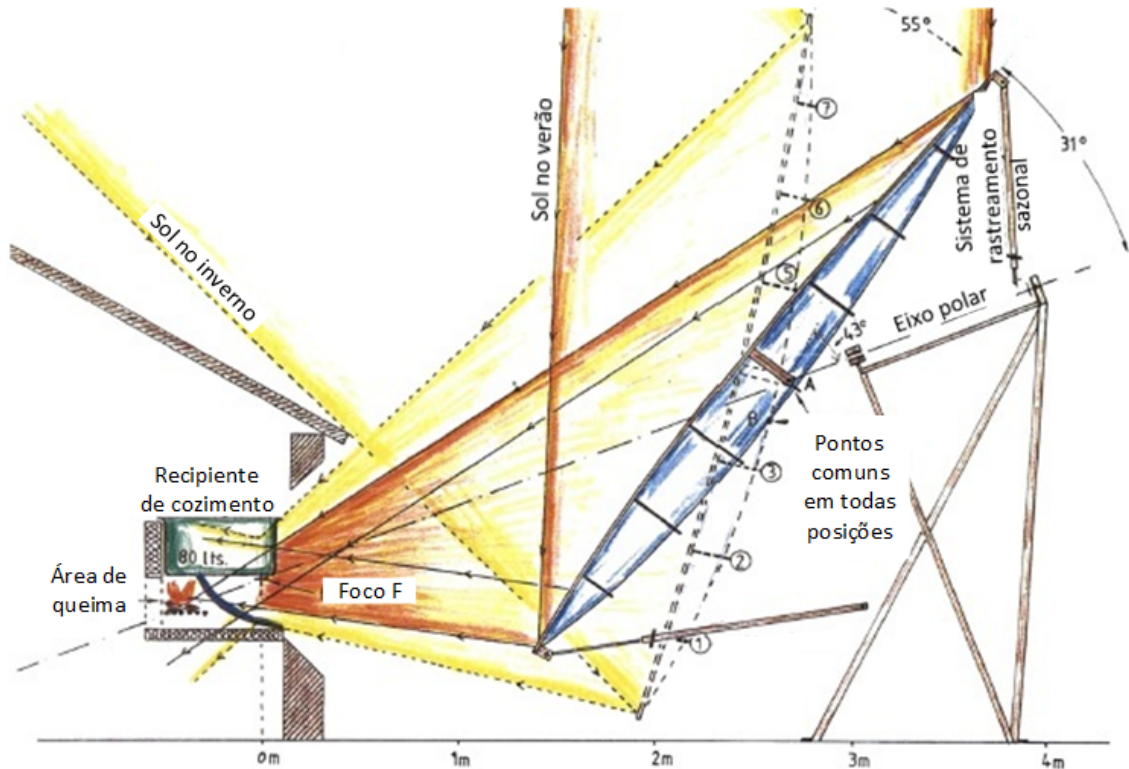


Figura 2.4 – Desenho esquemático da cozinha comunitária com concentrador solar Scheffler. Oelher e Scheffler (1994).

central, por exemplo, utiliza heliostatos com sistemas de rastreamentos individuais que refletem a radiação solar direta para o receptor que, por sua vez, é instalado no alto de uma torre. A localização da torre em relação ao campo de heliostatos varia conforme o projeto. Os receptores destes concentradores solares, geralmente, são utilizados para geração de vapor em usinas termossolares. Como exemplo, usina termossolar *Generation 3 Concentrating Solar Power Systems* (NREL, 2019) possui um campo de heliostatos de 451.512 m². A radiação solar concentrada incide em um receptor que converte a energia em calor e transfere para sal fundido cuja temperatura de saída é 700°C. O sal utilizado foi uma combinação de cloretos: cloreto de potássio (KCl), cloreto de magnésio (MgCl₂) e cloreto de sódio (NaCl). O projeto está em andamento, e o objetivo é que o custo da energia produzida seja aproximadamente U\$ 0,05 por kWh.

Outro modelo de concentrador solar de foco fixo é o parabólico, que não possui sistema de rastreamento, mas que recebe a radiação solar de um ou mais heliostatos. O trabalho de Ries e Schubnell (1990) é um exemplo. O sistema de rastreamento do heliostato era de dois eixos, mas com duas possibilidades testadas nesse arranjo, ilustradas pelas Figuras 2.5A e 2.5B. A diferença entre os dois heliostatos está na posição de um dos eixos, em que um é horizontal e o outro é vertical.

O coletor construído por Ries e Schubnell (1990) possui dois estágios de concentração. O heliostato possui 52 m² de refletor, e a 100 m de distância é fornecida uma imagem com

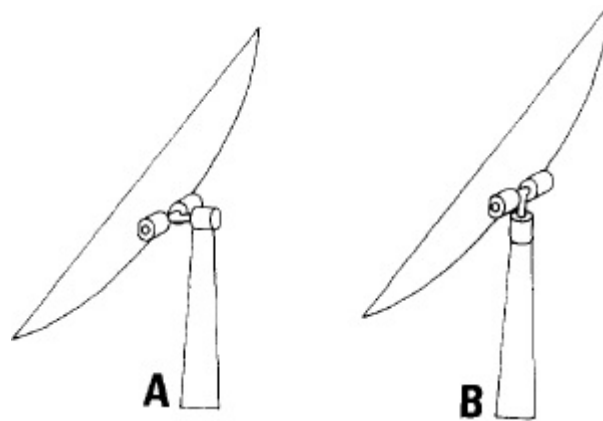


Figura 2.5 – Configuração dos eixos do heliostato. Ries e Schubnell (1990).

aproximadamente 1 metro de diâmetro. O concentrador solar possui $5,7 \text{ m}^2$ e intercepta os raios refletidos pelo heliostato a 70 metros do mesmo. A imagem formada pelo concentrador foi projetada para ter um diâmetro de 6 cm. A figura 2.6 mostra a disposição esquemática do coletor solar.

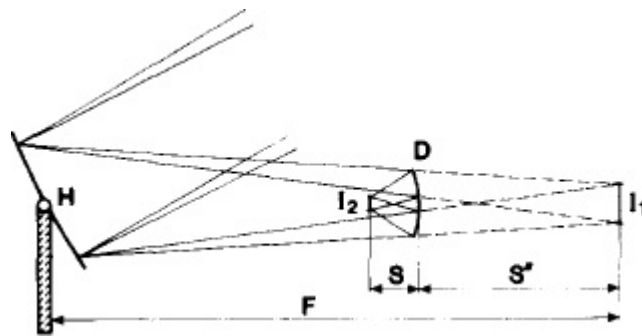


Figura 2.6 – Esquema da disposição dos equipamentos do coletor. Ries e Schubnell (1990).

Projetos de concentradores que utilizam heliostatos tendem a ter perdas pela transmissividade atmosférica entre o heliostato e o concentrador ou receptor, devido à distância que pode variar de poucos metros a mais de 1,5 km conforme a usina termo solar de NREL (2019) (BALLESTRÍN et al., 2018). Outra desvantagem comum em concentradores parabólicos, e que ocorreu também no trabalho de Ries e Schubnell (1990) é o sombreamento sobre a superfície dos espelhos do paraboloide, que é possível verificar na figura 2.6, causado pelo receptor do coletor, que poderia ser, por exemplo, uma máquina stirling, incluindo todos os acessórios como suporte e cabecamentos. Segundo os autores, quanto maior for a área do concentrador, menor é a fração do sombreamento. Outro problema relatado pelos autores foi o aparecimento do efeito de astigmatismo, causado pela reflexão oblíqua do heliostato, mas que poderia ser solucionado aumentando-se a curvatura deste. A imagem do concentrador é discutida em detalhes na seção 2.3.

Outro trabalho com o concentrador solar Scheffler foi realizado por Gotz (2003) que comparou a capacidade de armazenamento térmico entre dois blocos cilíndricos. Um



Figura 2.7 – Fixação entre o bloco de aço e estanho com a carenagem de aço inox. Gotz (2003).

bloco foi feito de alumínio maciço, com massa de 25 kg, e o outro era um recipiente de aço preenchido com estanho, de massa de 28 kg. O aquecimento foi realizado com um concentrador solar Scheffler com refletor de 8 m². A figura 2.7 ilustra o bloco de aço e estanho sem o isolante térmico. A face superior e inferior do cilindro era removível para que fosse possível utilizar a energia armazenada para o cozimento durante a noite. O aquecimento foi realizado pela superfície inferior dos blocos até que estes atingissem 400°C, e, então, essa superfície foi fechada com o isolante térmico.

Segundo Gotz (2003), na mudança de fase do estanho, a 200°C, foi armazenado 0,5 kWh e a quantia total armazenada pelos dois blocos, acima de 180°C foi de aproximadamente 1 kWh. Essa última temperatura foi considerada, pelo autor, a mínima para cozimento. Na região entre 180 e 300°C, o bloco cilíndrico de aço recheado com estanho demonstrou uma maior taxa de aumento de temperatura do que o bloco maciço de alumínio.

Na Índia, a utilização de cremação é comum. O aquecimento da câmara de combustão é feito, comumente, pela queima de algum gás ou madeira. Com base nas dimensões dessa câmara, Scheffler (2006a) construiu um crematório adaptado para ser aquecido pelo concentrador solar Scheffler (figura 2.8). Foram testados concentradores com área de abertura diferentes. O primeiro concentrador teve a área de abertura de 50 m², cuja razão de concentração foi de aproximadamente 600. A câmara tinha o comprimento de 2 metros e a temperatura máxima foi de aproximadamente 700°C. Entretanto, não foram divulgados mais detalhes deste teste.

Após algumas variações entre área de concentrador e receptor, tendo sido testado lentes Fresnel como concentrador secundário na zona focal para intensificar a razão de concentração, o autor construiu um concentrador Scheffler com a área de abertura de 3,4 m². A razão de concentração verificada foi de aproximadamente 676. O receptor consistia numa chapa circular que tampava a câmara de combustão. No centro dessa chapa havia uma cavidade para a entrada da radiação solar concentrada cujo diâmetro foi de 80



Figura 2.8 – Crematório Solar. Scheffler (2006a).

mm (figura 2.9). O sistema foi montado de modo que a cavidade da chapa ficasse na zona focal do concentrador solar. A potência verificada na entrada do absorvedor foi de aproximadamente 1000 W e a temperatura máxima atingida foi de 900°C (SCHEFFLER, 2006a).



Figura 2.9 – Fluxo de ar saindo pelo orifício da cavidade do forno de cremação. Scheffler (2006a).

Outros trabalhos demonstram aplicações de concentradores Scheffler em cozinhas, como apresenta a publicação de Schapers (2009), no México. Nesse trabalho, o concentrador substituiu o gás de cozinha, que era utilizada em uma cooperativa de 15 pessoas. O sistema foi equipado com seis concentradores Scheffler com área de 10 m² (figura 2.10). Esse sistema produzia 250 litros/dia de xarope de agave, a mesma quantidade do sistema anterior, a gás. A configuração do receptor desse trabalho foi semelhante ao mostrado pela figura 2.4.

Os trabalhos de Nyahoro, Johnson e Edwards (1997) e Muller e Arias (2009) mostram outros dois sistemas para cozinhas. Tais fornos possuem materiais com função de capacitor térmico para diminuir as flutuações em passagens de nuvens e para estender o tempo de cozimento à noite.



Figura 2.10 – Cozinha solar com vários concentradores solares Scheffler. Schapers (2009).

O coletor solar de Nyahoro, Johnson e Edwards (1997) era composto pelo concentrador solar Scheffler, um refletor secundário próximo à zona focal e o receptor, que tinha um sistema de armazenamento de energia térmica na zona focal. O objetivo do estudo dos autores era comparar diferentes materiais utilizados para armazenar calor e comparar com o modelo proposto para prever o comportamento térmico do coletor durante a armazenagem de calor. A configuração da cozinha utilizada pelos autores foi semelhante à da figura 2.4.

O bloco (capacitor térmico) era um cilíndrico isolado termicamente e foi instalado na parte inferior da panela. O fundo desse bloco era a entrada de radiação solar concentrada, zona de aquecimento. Uma parte do isolante térmico, igual ao tamanho da janela de entrada de energia solar, foi retirada expondo-o para a incidência da radiação solar. Nessa cavidade um vidro foi colocado para diminuir as perdas térmicas por convecção e por radiação térmica. Na zona de aquecimento havia uma camada de superfície seletiva para intensificar a conversão de radiação solar em térmica. A superfície superior do bloco, zona de transferência, era isolada termicamente durante o período de aquecimento. Depois, esse isolante térmico era removido para dar lugar a um recipiente cilíndrico de aço inox de 50 litros com água.

Para os testes, os autores mantiveram o foco do concentrador solar incidente no receptor por 140 minutos para carregamento térmico do bloco de armazenamento. Após esse período o concentrador foi desviado da direção de radiação para que fique sem imagem focal, e o isolante térmico foi inserido no local de entrada de radiação solar concentrada no receptor. Então, o isolante térmico da zona de transferência foi retirado e o recipiente de aço inox com água foi colocado. Este recipiente foi mantido até que a água entrasse em ebulição ou que a temperatura começasse a diminuir. Esses experimentos foram realizados para

comparar o comportamento térmico de um bloco de granito com outro de ferro fundido. A temperatura máxima atingida pelo granito foi de 570°C, enquanto que a atingida pelo ferro fundido foi 430°C. O tempo para a água entrar em ebulição com o bloco de granito foi de 56 minutos, enquanto que o tempo com o bloco de ferro fundido foi de 5,5 minutos (NYAHORO; JOHNSON; EDWARDS, 1997).

Segundo Nyahoro, Johnson e Edwards (1997), a diferença no tempo para a água entrar em ebulição e entre a temperatura na zona de transferência de calor com o granito e com ferro fundido se deve ao calor específico de cada material, sendo 3 J/kg.K e 52 J/kg.K, respectivamente, e 15,2 J/kg.K para o recipiente de aço inox. Durante os 140 minutos os blocos foram carregados com 60 MJ. Desse total, 16,8 MJ foram consumidos no aquecimento da água do recipiente, de 20°C para 100°C. Do restante, parte da energia ficou armazenada no bloco e parte foi perdida. De acordo com os autores, a perda excessiva no granito se deu pelo longo tempo de aquecimento da água, e também pela alta temperatura atingida na superfície na zona de aquecimento.

Em simulação, Nyahoro, Johnson e Edwards (1997) verificaram que quanto maior for a razão Altura/Diâmetro do bloco, menor é o tempo de aquecimento da água para ambos os blocos. Porém, a diferença entre o tempo de aquecimento da água no granito foi maior que no ferro fundido, com a razão variando em 0,07; 0,15 e; 0,20, sendo que esta última obteve os melhores resultados.

O forno do trabalho de Muller e Arias (2009) foi construído para padaria comunitária, em Jujuy, região árida na Argentina, na latitude de 22°S. A aplicação do concentrador Scheffler nessa padaria substituiu o uso de lenha em dias de Sol. Antes da instalação do concentrador solar Scheffler, eram consumidos 30 kg/semana de lenha.

O receptor foi acoplado ao forno, cujo volume era de 200 litros. A figura 2.11 mostra o layout com forno, onde as setas alaranjadas representam a circulação do ar por convecção natural. O espaço abaixo daquele utilizado para alimentos, era utilizado para o absorvedor e pedras, que eram utilizadas como capacitor térmico. O ar interno era aquecido pelo absorvedor de radiação e resfriado no alimento (caso houvesse) e nas pedras.

Na entrada de radiação solar concentrada no receptor foi instalado um vidro cerâmico com antirreflexo. O absorvedor foi construído com chapas de ferro soldadas de modo que ficassem dispostas em perfil de "zigue-zague", com as arestas distanciadas em 3 cm e 35 cm de profundidade, a fim de aumentar a área de contato com a incidência de radiação solar. A figura 2.12 mostra uma imagem do compartimento do absorvedor e das pedras (capacitores térmicos). De acordo com Muller e Arias (2009), quando as pedras estão aquecidas, o forno não necessita de incidência de radiação solar. Então, quando o concentrador é coberto por nuvens, ou quando o forno é utilizado após o por do Sol, o sentido da circulação do ar mostrada pela figura 2.11 inverte-se devido aos efeitos convectivos.

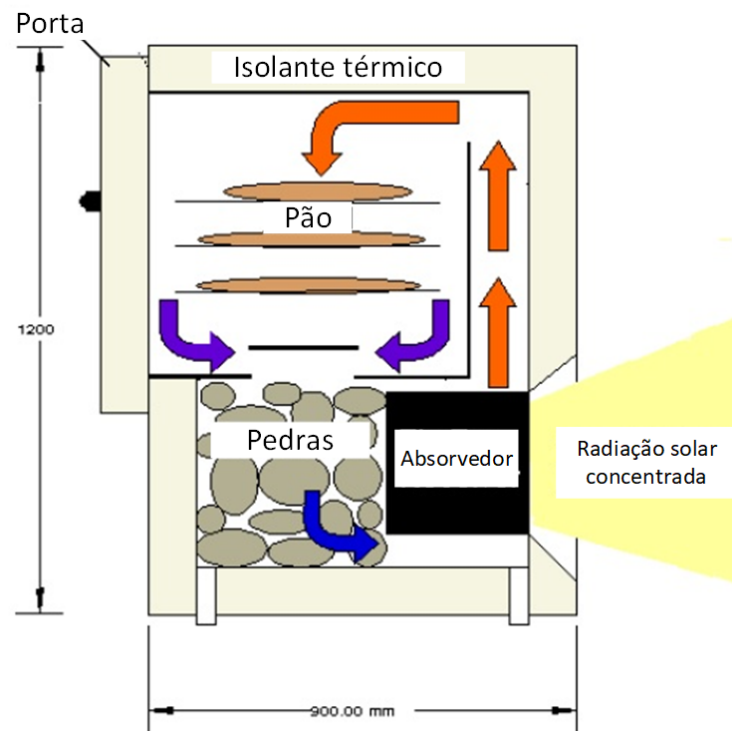


Figura 2.11 – Esquema do forno de Muller e Arias (2009)



Figura 2.12 – Absorvedor "zig-zag" e pedras (capacitores térmicos) do forno de Muller e Arias (2009)

Com o absorvedor a 300°C, a eficiência térmica foi de aproximadamente 40%, e a potência, 1200 W. O armazenamento da energia térmica pelas pedras não foi considerado nos cálculos, portanto, a eficiência do sistema pode ser maior. A temperatura máxima verificada foi de 360°C, com potência de aproximadamente 3 kW (MULLER; ARIAS, 2009).

Após 75 minutos de aquecimento com o forno vazio, foram inseridos dois recipientes

com um litro de óleo cada, sendo que um recipiente ficou na parte superior e o outro na parte inferior da câmara. Após 45 minutos, o recipiente da parte superior estava a 200°C, e o inferior estava a 170°C. E de acordo com os autores, essa diferença ocorreu devido ao movimento de convecção natural do ar.

O sistema de rastreamento diário desse trabalho foi construído com materiais elétricos e mecânicos. A parte elétrica foi feita com uma placa fotovoltaica de 1 W (270 mA, 6 V), sensor com LED e um motor elétrico. Esse motor movimentava uma coroa, que possuía um redutor com proporção de 1:60000. De acordo com Muller e Arias (2009), este sistema teve precisão de 0,1° (20 segundos).

Observando novamente a figura 2.3, um eixo paralelo a diretriz que coincide com o foco paraboloidal. Este eixo é coincidente com o parabolóide em dois pontos. Em um deles, a figura 2.3 mostra um concentrador Scheffler. No outro ponto coincidente, também pode ser desenhado outro concentrador de forma que um seja o espelho do outro. Dessa forma é possível que sejam projetados dois concentradores Scheffler para um único receptor, sendo um concentrador no lado sul do foco (Concentrador Scheffler Sul) e o outro, no lado norte (Concentrador Scheffler Norte). Essa simetria e efeitos sobre o foco estão mais bem detalhados na seção 3 e no capítulo 4.

Bhirud e Tandale (2006) realizaram um trabalho experimental cuja bancada foi composta por um forno (receptor) e dois concentradores solares Scheffler com área de abertura de 10 m² cada um. A área disponível na região focal foi de 0,225 m², portanto, o fator de concentração geométrica foi de 32,4. Os autores avaliaram a eficiência do sistema pela curva de aquecimento e resfriamento do forno. Os espelhos utilizados eram de acrílico. Foi utilizado um refletor secundário para cada um dos concentradores solares, os quais eram de folha de alumínio anodizado e com a área de reflexão de 0,56 m². Estes estavam com inclinação de 45° de modo a refletir a radiação concentrada para o interior do forno, que estava localizado entre os dois refletores secundários, conforme mostrado na figura 2.13.

No teste de aquecimento e resfriamento, placas de aço foram inseridas no forno. As placas foram arranjadas de forma simétrica com a incidência de radiação. A placa de cima foi aquecida pelo concentrador Scheffler Sul, e a placa posicionada na parte de baixo, pelo Scheffler Norte. Bhirud e Tandale (2006) instalaram termopares na superfície (das placas) oposta à que recebia radiação solar concentrada vindas do refletor secundário. Foram coletadas informações da temperatura ambiente e da radiação solar com piranômetro. Os autores variaram entre placas com massa de 75, 100 e 150 kg, durante cinco dias.

Após os testes, os autores realizaram cálculos do fator de perdas globais de calor, $F'U_L$, e da eficiência óptica, $F'\eta_o$, com base no método da constante de tempo conforme a publicação de Mullick, Kandpal e Kumar (1991). No teste de resfriamento, os concentradores solares foram desfocados e o forno foi protegido da incidência da radiação solar direta.

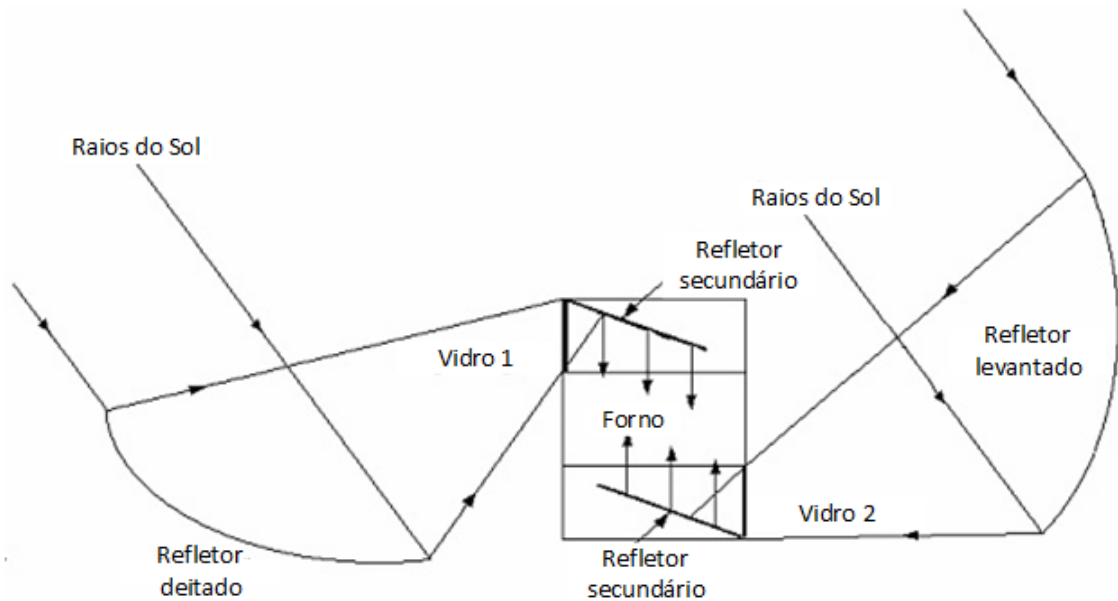


Figura 2.13 – Esquema com dois concentradores e um forno Bhirud e Tandale (2006).

Essa curva auxiliou no cálculo do fator global de perdas de calor, $F'U_L$, sendo possível, então, a realização do cálculo de $F'\eta_o$. De acordo com os autores, o bloco de massa $m = 75$ kg, $m = 100$ kg e $m = 150$ kg atingiram 150°C em 19, 27 e 60 minutos, respectivamente. O forno carregado com o bloco com massa de 100 kg apresentou menores perdas globais e maior eficiência óptica.

De acordo com Bhirud e Tandale (2006), o sistema forneceu 2,5 kWh em 8 horas de funcionamento, sob incidência média de radiação solar direta de 700 W/m^2 . A eficiência global, que foi definida como a taxa da energia entregue pela energia coletada, com o forno carregado com blocos de aço de 75 kg e 100 kg foi de 18%, enquanto que para o forno carregado com blocos de aço com 150 kg foi de 12%. Essas variações podem ser consideradas como efeito da convecção externa do forno, pois é influenciada pela direção do vento em relação aos concentradores solares, que podem ser barreiras ou canalizar a corrente de ar para o forno (KUMAR; KANDPAL; MULLICK, 1994; KUMAR et al., 1997).

Os cálculos de $F'U_L$ e de $F'\eta_o$ apresentados na publicação de Bhirud e Tandale (2006) foram realizados com base nos trabalhos de Mullick, Kandpal e Kumar (1991), que publicaram o método de cálculo dos dois fatores, e Kumar, Kandpal e Mullick (1993), Kumar, Kandpal e Mullick (1994) que testaram o resultados obtidos por equações para diferentes inclinações de concentrador solar parabólico e diferentes velocidades de vento. O termo $F'U_L$ é uma função da capacidade térmica do receptor, $(mC_p)'$, da área em que ocorre as perdas de calor para o ambiente, A_r , e da constante de tempo.

Tyroller (2006) construiu um esterilizador solar, na zona rural da Índia, com a autoclave com o volume de 76 litros. A área de reflexão do concentrador solar utilizado foi

de 10 m². O sistema era híbrido entre energia solar e gás combustível, ou energia solar e energia elétrica. A figura 2.14 ilustra o layout do sistema de esterilização solar.

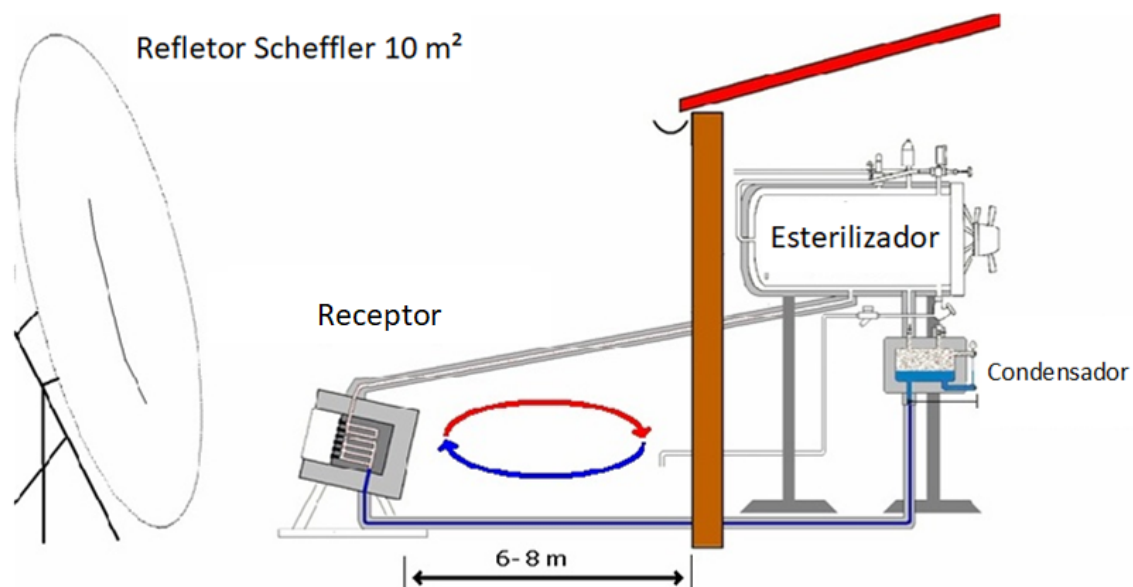


Figura 2.14 – Esquema do sistema de esterilização solar. Tyroller (2006).

Dentro do receptor havia um bloco de ferro de 230 kg que convertia a energia solar em energia térmica. Dentro desse bloco de ferro havia uma serpentina onde ocorria a evaporação de água do sistema. O isolamento deste bloco foi feito com 200 mm de lã de rocha e fixado entre a carenagem e o absorvedor. Na zona focal frontal, entrada da radiação solar no receptor, havia um vidro termorresistente para diminuir as perdas por convecção. À noite a zona focal era tampada com isolante térmico para evitar perda de calor do absorvedor. A figura 2.15 mostra o absorvedor montado.



Figura 2.15 – Receptor do concentrador solar Scheffler da autoclave de Tyroller (2006).

A autoclave era utilizada quatro vezes ao dia. Segundo os autores, a temperatura mínima do vapor saturado para a esterilização é de 121°C e foi atingida aproximadamente às 8 h 30 min. A temperatura máxima foi acima de 500°C, aproximadamente às 14 h 30 min. Segundo Tyroller (2006) a eficiências térmicas do sistema variou entre 61% e 42% para temperaturas do vapor saturado respectivamente entre 250°C e 400°C.

Uma unidade de destilação solar multiestágio foi construída e analisada por Chandak e Somani (2009). Esse sistema foi projetado com quatro estágios de evaporação. No primeiro estágio o fluido era aquecido por dois concentradores solares Scheffler com área da elipse do refletor de 16 m² cada. Os receptores eram individuais, isto é, havia um receptor para cada concentrador solar. O diâmetro de cada absorvedor foi de 400 mm, e a razão de concentração geométrica foi de 117. Ambos os absorvedores estão conectados em paralelo com o tanque de separação de água e vapor. A figura 2.16 mostra um esquema de destilação de água construído com concentrador solar Scheffler. A figura 2.16 mostra um esquema do sistema de destilação de água salgada. O sistema possuiu três outros evaporadores e um condensador que carrega os três evaporadores com água.

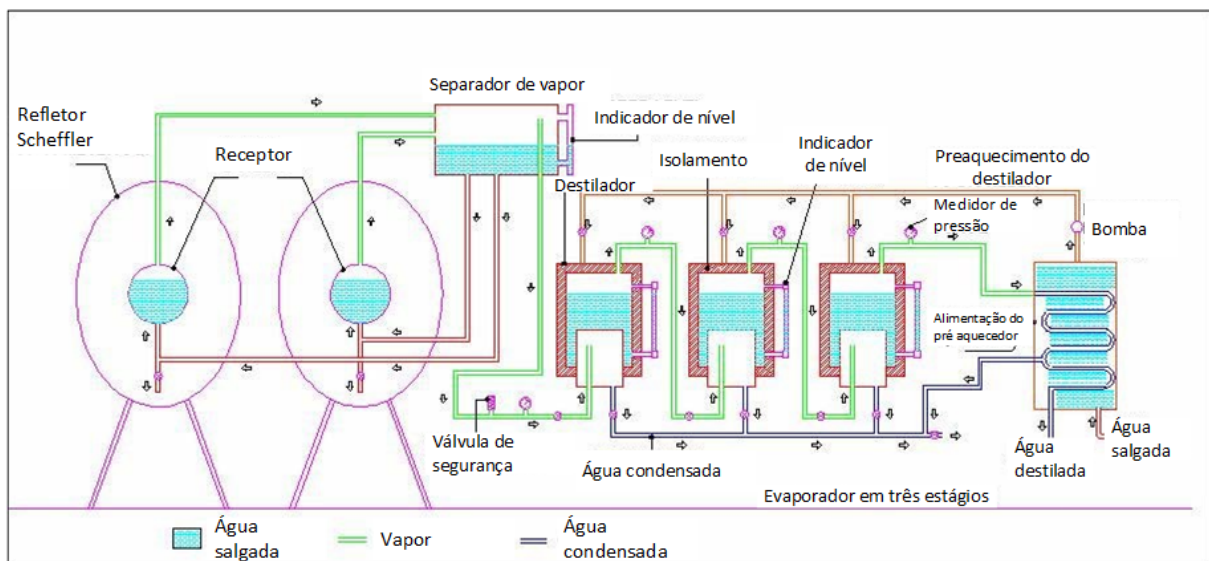


Figura 2.16 – Esquema do sistema de destilação de água de Chandak e Somani (2009).

A entrada de água nesse sistema se dá pelo tanque de armazenamento de vapor e pelo condensador. A água do tanque de armazenamento, por gravidade, é conduzida para um dos absorvedores, onde é gerado o vapor saturado que retorna para o tanque de armazenamento. Este vapor fornece calor para o primeiro gerador de vapor sendo, então, condensado. O vapor gerado nesta etapa fornece calor para o próximo gerador de vapor, saindo na forma condensada. O vapor deste segundo gerador de vapor é encaminhado para o terceiro, e último, gerador de vapor, onde é condensado pela transferência de calor. O vapor originado nesse último gerador é encaminhado para o condensador, transferindo calor para a água de entrada.

A figura 2.17 ilustra a fotografia do sistema, no qual estão destacados os concentradores solares Scheffler, o absorvedor com o foco do concentrador solar, o tanque de armazenamento de água e os três evaporadores. Tanto na figura 2.16 quanto na figura 2.17 é possível observar que, no tanque de armazenamento de água e nos três evaporadores, há um indicador de nível de água. De acordo com Chandak e Somani (2009), o sistema de bombeamento e de válvulas do sistema é todo manual.



Figura 2.17 – Sistema de destilação de água Chandak e Somani (2009).

De acordo com Chandak e Somani (2009), a pressão máxima atingida no tanque de armazenamento foi de 8 bar, porém o absorvedor foi dimensionado para pressões de até 10 bar. E, segundo os autores, o rendimento do concentrador, em termos de geração de vapor por área de refletor foi de 6,5 l/m².

Chandrashekara e Yadav (2017) construíram um sistema de dessalinização com ciclo de aquecimento indireto, isto é, um fluido térmico era aquecido no receptor e transferia calor à água salgada no resfriador. Os autores compararam dois absorvedores. Ambos eram feitos de placa plana. A superfície de um era lisa com pintura preta simples, e outro era rugoso com aplicação de grafite esfoliado expansível, com absorvidade para radiação solar de $\alpha = 0,97$ e área de superfície, quando expandido, de 320 m²/g.

Segundo os autores, o absorvedor com pintura simples apresentou descascamento da tinta entre 120°C e 150°C. A superfície com grafite expansível se manteve quando a temperatura atingiu 643°C. A eficiência térmica máxima e a produção total de água



Figura 2.18 – Sistema de aquecimento com dez concentradores Scheffler. Lukhi (2009).

destilada com o absorvedor com grafite que estava instalado foi de 40% e 4,7 l, versus 31% e 3,6 l para o receptor com tinta preta.

A Gadhia Solar[®] é uma empresa indiana fundada por Deepak Gadhia e que trabalha com um acordo colaborativo com Wolfgang Scheffler para a construção de concentradores solares também com finalidade filantrópica (GADHIA, 2009). O autor iniciou as instalações do sistema de geração de vapor através de energia solar nos templos da religião Brahma Kumaris.

O maior sistema instalado por Gadhia (2009) foi dimensionado para 30000 refeições diárias, sendo constituído por 106 concentradores solares tipo Scheffler com área de reflexão de 10 m² em cada refletor. E até então, o autor afirmou estar construindo um sistema ainda maior, dimensionado para 40000 refeições diárias, sendo alimentado por 73 concentradores solares Scheffler com refletor de 16 m².

Um sistema com 10 concentradores solares Scheffler foi instalado em uma indústria alimentícia na Índia. Este sistema produzia 350 kg de vapor por dia a pressão de 600 kPa (GADHIA, 2009; LUKHI, 2009). Como sistema de apoio, havia 6 caldeiras capazes de produzir 400 kg de vapor por dia. A figura 2.18 ilustra o sistema, que foi montado na cobertura desta indústria.

Em 300 dias de uso, a indústria de Lukhi (2009) produziu 120 toneladas de produtos. Este sistema de concentradores solares Scheffler, cuja área de cada refletor foi de 10 m²,

gerou uma economia de 70 toneladas de lenha, o equivalente a 175.000 Rúpias¹ (moeda local).

Patil, Awari e Singh (2011) realizaram um estudo do comportamento térmico na geração de vapor de água em um sistema montado com um concentrador solar Scheffler de 8 m² de área na elipse do refletor e um receptor acoplado em um reservatório cilíndrico com capacidade de 20 litros de água. A bancada experimental dos autores foi semelhante à cozinha solar de Oelher e Scheffler (1994) (Figura 2.4) com a diferença de o reservatório estar no lugar da panela.

A base do reservatório foi pintada para intensificar a absorção de energia solar. A entrada de água se dava pelo lado superior do reservatório, onde havia uma válvula antirretorno. A saída de água se localizava próximo à base do reservatório, onde havia uma válvula de alívio de pressão. O tanque suportava até 0,588 MPa de pressão.

Os autores monitoraram as temperaturas da água e do ambiente, a radiação solar e a velocidade do vento. Os testes foram realizados em Bangalore, Índia, durante um ano. Os dados foram registrados entre as 9 e 17 horas, com intervalos de 5 minutos.

Para o cálculo da energia disponível no fluido (Q_u), os autores utilizaram a definição de Funk (2000), cujo protocolo limita as condições ambientais em: velocidade do vento menor que 1,0 m/s para convecção natural e maior que 2,5 m/s para convecção forçada; temperatura ambiente entre 20°C e 35°C e; intensidade de radiação solar entre 450 e 1100 W/m² com variações máximas de 100 W/m² no intervalo de 10 minutos.

Nos testes de Patil, Awari e Singh (2011), a radiação direta variou entre 700 e 800 W/m². Dos 20 litros de água no reservatório, houve evaporação de 10%. A potência média e a eficiência verificada por Patil, Awari e Singh (2011) foi de 1,3 kW e com 21,61% respectivamente, e com a radiação solar média de 742 W/m².

Um sistema de coletor solar para destilação de plantas medicinais e aromáticas foi construído e avaliado por Munir e Hensel (2009), Munir e Hensel (2010) e Munir et al. (2014). O projeto foi realizado na Alemanha, sob a latitude de 51,3°N. Os autores avaliaram secagem das plantas melissa, hortelã, alecrim, cominho e cravo. No trabalho de Munir et al. (2014), há uma compilação da publicação dos dois anteriores acrescida de uma análise econômica.

O sistema foi composto por um concentrador solar Scheffler com elipse de 8 m². O espelho instalado era de alumínio com refletividade $\rho \geq 0,87$. O sistema de rastreamento diário foi composto por um sistema de relógio alimentado por duas placas fotovoltaicas de 0,5 V e 300 mA cada. Havia, também, um refletor secundário que redirecionava a radiação vinda do concentrador solar para o fundo de uma unidade de destilação, que é procedida por um condensador.

¹ Valor não atualizado, baseado na publicação de Lukhi (2009).

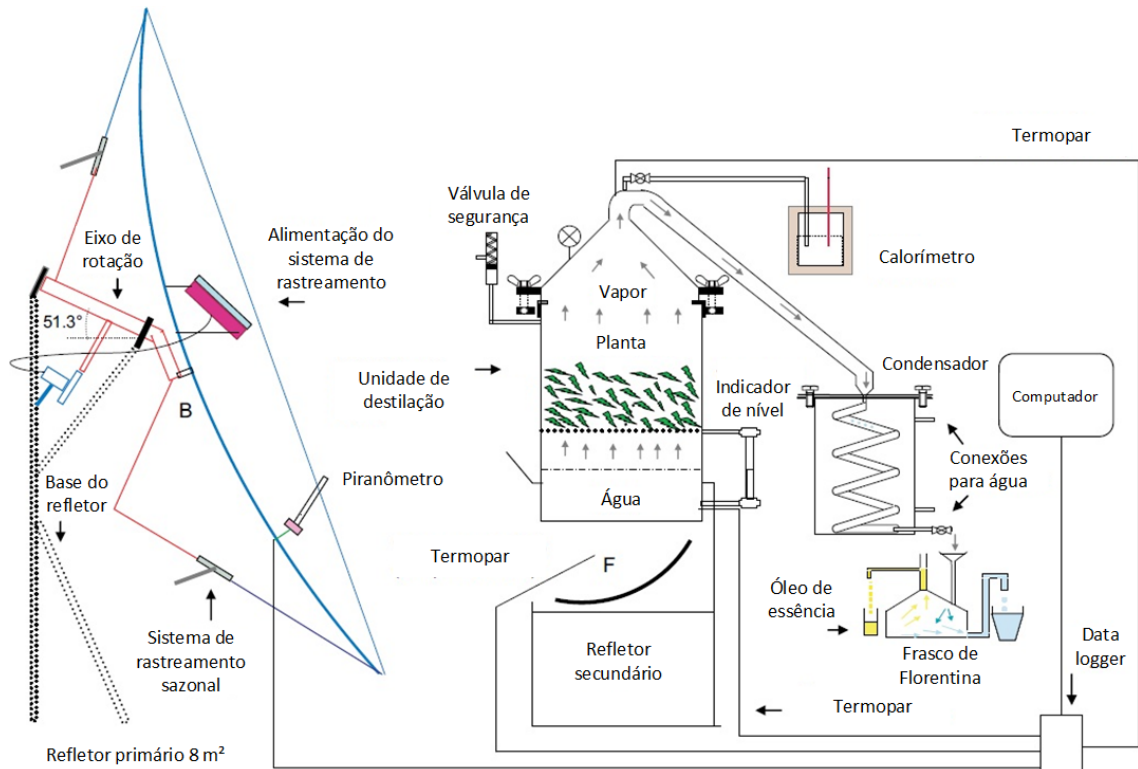


Figura 2.19 – Esquema da unidade de destilação solar (MUNIR; HENSEL, 2010).

O receptor foi acoplado na unidade de destilação, que era um cilindro com altura de 1210 mm e diâmetro de 400 mm. Na parte superior da unidade de destilação um tubo direcionava o fluido para o trocador de calor, conforme ilustrado pelo esquema da figura 2.19. Na saída do vapor, entre o trocador e a unidade de destilação, foi instalado um calorímetro para medir a taxa de evaporação.

Os autores monitoraram o sistema por medição das temperaturas da zona focal, água, vapor e processo de destilação e da radiação solar direta ortogonal à incidência com um piranômetro adaptado. Essa adaptação foi feita pela instalação de um tubo de modo que o sensor ficasse em uma das aberturas desse tubo. O piranômetro foi instalado no refletor Scheffler com o eixo do tubo direcionado para o disco solar de forma a medir a radiação solar direta.

O espelho utilizado no refletor secundário foi o mesmo material que o do refletor do concentrador Scheffler. O absorvedor era a superfície inferior da base cilíndrica da unidade de destilação. Essa superfície foi pintada com tinta seletiva para intensificar a absorção de radiação solar. Para o cálculo da eficiência térmica, Munir e Hensel (2010) utilizaram a seguinte equação:

$$\eta_t = \frac{10^3 \times E_p}{\int_{t=0}^{t_p} (G_{b;m}) \times A_s \times dt} \quad (2.1)$$

Onde E_p é a energia total, t , o tempo, $G_{b;m}$, a radiação direta média no tempo t , e

A_s , a área de abertura do concentrador solar Scheffler, que é dada por:

$$A_s = (\pi \cdot a \cdot b - 0,1) \times \cos\left(43,23^\circ \pm \frac{\delta}{2}\right) \quad (2.2)$$

Em que a é o raio menor da elipse, 1,37, e b é o raio maior, 1,88. A instalação do piranômetro e das duas placas fotovoltaicas diminuíram a área elíptica em 0,1 m². A energia total do sistema foi calculada por:

$$E_p = C_3 \sum_{i=1}^p \Delta T_i + C_4 \sum_{j=1}^q x_f \times m_{sj} \quad (2.3)$$

E as constantes C_3 e C_4 , de acordo com Munir e Hensel (2010), foram dadas por:

$$C_3 = \frac{(m_{\text{água}} + M_{\text{água}} \times m_h) + m_h (1 - M_{\text{água}} C_f)}{3600} \quad (2.4)$$

e

$$C_4 = \frac{h_{fg}}{3600} \quad (2.5)$$

para pressão atmosférica, $C_4 = 0,62777$.

No cálculo da declinação solar, pode-se utilizar a equação abaixo, de Spencer (1971) apud Duffie e Beckman (2006), cujo erro é menor que 0,035°.

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

O ângulo B do dia n pode ser calculado com:

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (2.7)$$

Nota-se que a única variável da equação 2.2 é a declinação solar, δ . Munir e Hensel (2010) consideraram os termos geométricos a e b como constantes mesmo que a superfície do concentrador seja flexível. Na seção 3 isso está mais bem discutido. Com a irradiação solar direta na faixa de 700 e 800 W/m², a temperatura na zona focal variou entre 300 e 400°C.

Em um teste realizado em dezembro (inverno no hemisfério norte) durante 5,9 horas, o destilador foi carregado com 20 litros de água mais a planta a matéria prima do óleo a ser extraído. O perfil de temperatura foi registrado junto com a radiação solar direta e a temperatura da zona focal. A energia total fornecida ao sistema foi de 9.136

kWh. A potência média calculada foi de 1.548 W, e a eficiência, 33,21%, para irradiância direta média de 863 W/m². De acordo com Munir e Hensel (2010), a proporção do volume de óleo extraído por unidade de massa de matéria prima seca foi de 0,614, 12,5, 5,79, 11,9, 61,8 ml/kg para as ervas de melissa, hortelã, alecrim, cominho e cravo, respectivamente.

Em um teste realizado entre às 12h70min e as 14h00min, com a média de radiação solar direta no plano perpendicular em 739 kW/m², a potência média e a eficiência do sistema foram de 1,58 kW e 43,25%, respectivamente. Em outro teste, com 400 g de erva de cominho em 10 litros de água, o processo resultou na extração de 4,06 ml com 3,01 kWh de radiação solar absorvida no receptor (MUNIR; HENSEL, 2009).

Para aumentar a quantidade de energia na entrada da unidade de destilação, os autores sugeriram a construção de concentradores solares com área de abertura maior. Mas, o aumento da eficiência também poderia ser obtido pela otimização no receptor. Um caminho para que isso seja obtido é pela análise dimensional e do perfil do fluxo de energia na imagem focal, bem como as variações dessas duas variáveis em função do funcionamento do sistema de rastreamento sazonal e as deformações decorrentes desse mecanismo na superfície do espelho do concentrador solar Scheffler. Dessa forma, a otimização poderia ser realizada pela diminuição da área de contato entre o absorvedor e o ambiente.

Dib (2009) realizou um trabalho de construção de um concentrador Scheffler com área da elipse de 2,7 m² para o aquecimento de um forno. A base do concentrador solar foi construída com perfis de aço carbono. A elipse, com perfis de aço carbono e de alumínio, pois a superfície necessitou ser flexível para os ajustamentos sazonais. O refletor foi composto de espelhos de vidro cortados em retângulos de 80 x 100 mm². A figura 2.20a mostra o concentrador solar Scheffler, construído por Dib (2009), em um ponto de vista próximo ao local da imagem do foco do concentrador.

Esse concentrador solar Scheffler também foi equipado com sistema de rastreamento em dois eixos. Um dos eixos, para rastreamento diário do Sol, tinha o movimento forçado por um contra peso e controlado por um sistema de pêndulo, ilustrado pela Figura 2.20b. Dessa forma, o sistema independia de outra fonte de energia senão a da gravidade.

Dib (2009) construiu um forno com o receptor acoplado. Esse receptor tinha uma cobertura de vidro, para mitigar a perda por radiosidade, e uma chapa de aço carbono com superfície seletiva para intensificar absorção da radiação solar. O isolamento foi feito com fibra cerâmica de densidade de 64 kg/m³.

O arranjo dos termopares instalados no forno e no receptor está ilustrado no esquema da figura 2.21. Foram utilizados termopares tipo K. O termopar T1 foi inserido no interior da placa absorvedora. Os termopares de T2 a T5 foi localizado no plano central longitudinal do forno e com alturas diferentes, para medições de temperatura em diferentes regiões internas deste forno. Os termopares de T6 a T9 foram instalados nas

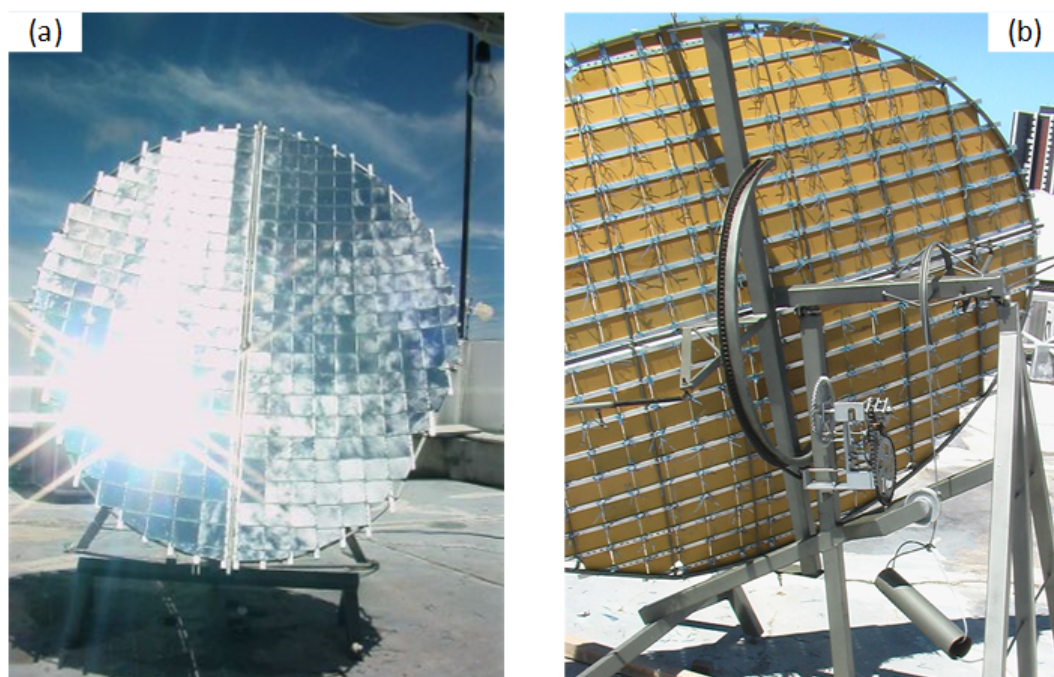


Figura 2.20 – Concentrador solar Scheffler de $2,7 \text{ m}^2$ de área elíptica, (a) espelhos de vidro e (b) sistema de rastreamento diário (DIB, 2009).

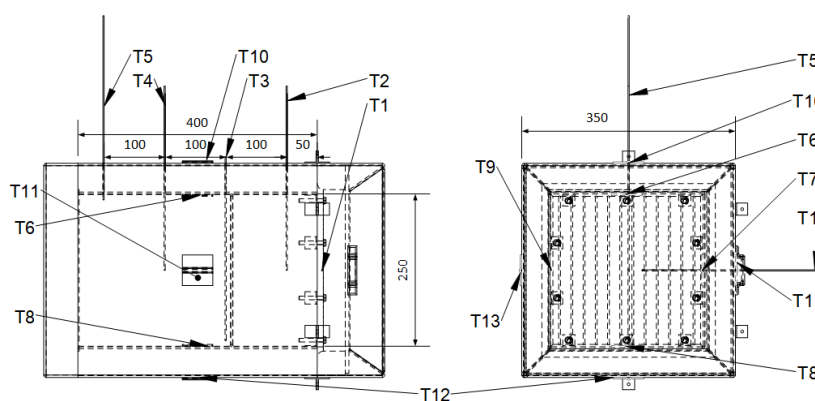


Figura 2.21 – Esquema de distribuição dos termopares do receptor forno. Dib (2009).

paredes inferior, superior e laterais do interior do forno. Os termopares de T10 a T13 foram instalados próximos às superfícies inferior, laterais e superior do lado externo do forno.

A figura 2.22 mostra o arranjo experimental de Dib (2009), onde é possível visualizar a imagem do foco incidente no receptor do forno receptor. Nos testes, Dib (2009) considerou as observações feitas por Funk (2000), citadas anteriormente.

Essa estrutura foi utilizada em outros trabalhos, por exemplo por Santos et al. (2016), que analisaram o preparo de pães no forno da figura 2.21. Os autores colocaram três amostras de massa de pão no forno. A primeira foi retirada do forno após 60 minutos, a segunda, após 80 minutos, e a terceira, após 100 minutos. Então, foram retiradas duas amostras de cada um dos três pães, com massa entre 2 e 3 g. Estas amostras foram deixadas

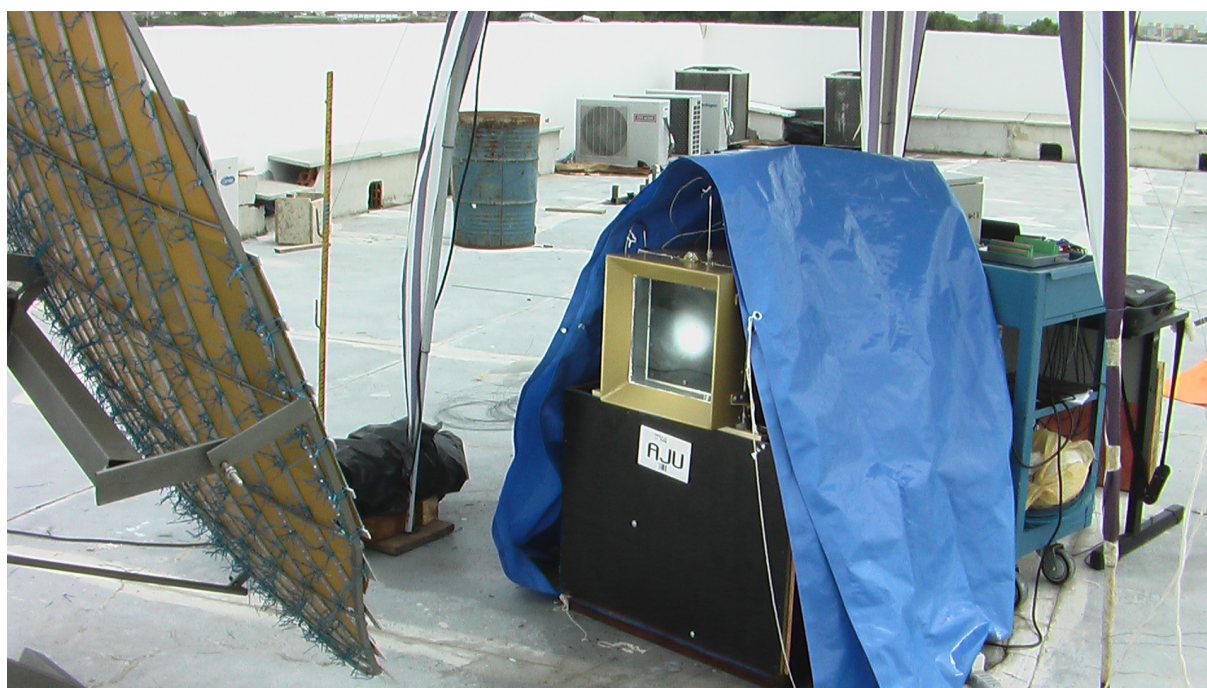
Tabela 2.1 – Perda diária de umidade do pão do experimento de Santos et al. (2016).

Tempo [dia]	60 min [g]	80 min [g]	100 min [g]
0	2,0015	2,0018	2,0003
1	0,64685	0,6775	0,64925
2	0,6487	0,68145	0,6512
3	0,64825	0,68355	0,6516
4	0,65185	0,685	0,6547
Variação de perda de massa	0,005	0,0075	0,00545
Perda de massa [%]	25	37	27

em forno com temperatura constante de 105°C, durante quatro dias, sendo retirada para pesagem.

A tabela 2.1 compara o processo de pesagem durante os quatro dias. Na linha "dia 0" o valor é a massa média das amostras de cada um dos três pães. Os dados entre os dias 1 e 4 são a massa perdida média de cada fornada. As variações entre amostras foram registradas entre 5 e 7,5 μg , e a perda de massa das amostras foi maior no pão da fornada de 80 minutos (37%) e menor na fornada de 60 minutos (25%).

Conforme o destaque da tabela 2.1 sobre a perda de massa, os autores explicam que o tempo de cozimento altera a quantidade de água na massa e, também, as propriedades nutricionais contidas nas mesmas. O pão de 80 minutos de forno foi o que apresentou maior quantidade bruta de proteínas, enquanto que, o pão de 100 minutos, apresentou a

**Figura 2.22** – Bancada experimental do coletor concentrador Scheffler de Dib (2009).

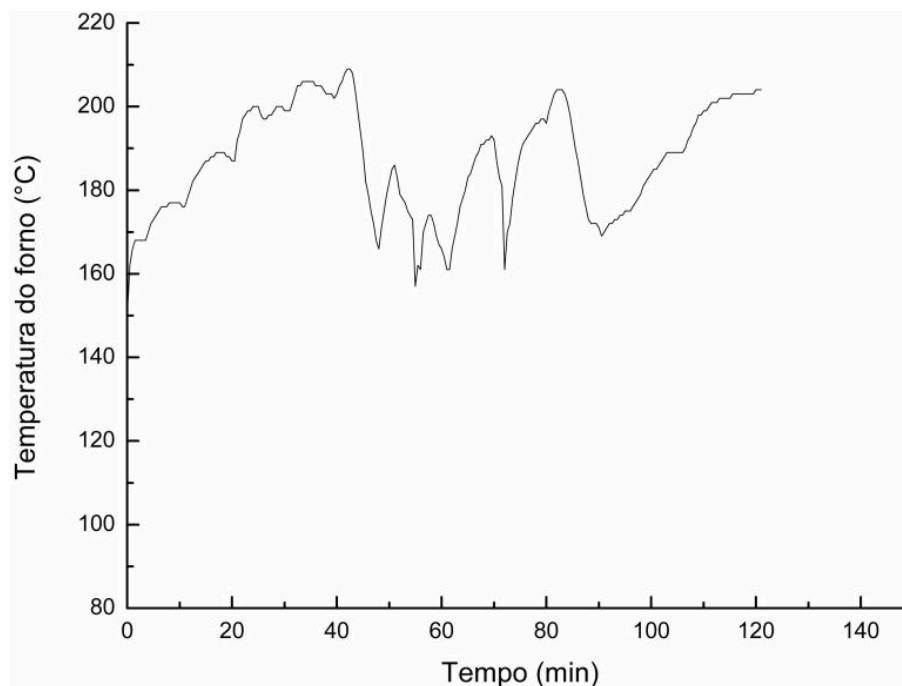


Figura 2.23 – Curva da temperatura interna do forno durante o experimento de cozimento dos pães (SANTOS et al., 2016).

maior quantidade de alvéolos (bolhas na massa assada), que facilita a perda de massa em função do tempo, entre as três amostras.

A figura 2.23 mostra a curva da temperatura interna do forno durante o aquecimento dos pães. Segundo Santos et al. (2016), a não continuidade na subida de temperatura foi devido à presença de nuvens, que causaram o efeito de inércia térmica no forno. Durante o cozimento, a temperatura do forno variou entre 150°C e 209°C. No tempo de 60 e 80 minutos, a porta do forno foi aberta para retirada das respectivas amostras. Estas aberturas da porta causaram, também, uma diminuição conforme a curva da figura 2.23.

Outro teste com a estrutura da bancada de Dib (2009) foi publicado por Dib et al. (2020), que analisaram o desempenho térmico e ótico do sistema sob condições climáticas adversas, isto é, com nuvens com transmissividade não nula, ou seja, nuvens com densidade baixa, de modo a permitir que radiação solar direta passasse através dela. O forno foi testado vazio.

Para estes testes foram parcialmente levadas em conta o protocolo de Funk (2000), citados na página 53. Foi desconsiderado o item da variação de incidência de radiação solar em, no máximo, 100 W/m² para 10 minutos. Pois, caso contrário, não seria possível testar o coletor em clima adverso, uma vez que as nuvens causam oscilações irregulares e intensas na radiação solar direta.

Para o cálculo do desempenho térmico, foram consideradas as metodologias de Mullick, Kandpal e Kumar (1991) para cálculo do $F'U_L$ e $F'\eta_o$, respectivamente. O teste foi realizado em duas etapas: primeiro aquecimento, a partir das 10 horas, seguido de

resfriamento, a partir das 14 horas. Para início do resfriamento do forno, a imagem do foco do concentrador foi desviada do receptor.

A temperatura máxima atingida no interior da placa absorvedora, registrada em T1, foi de 338°C, com a presença de nuvens, conforme relatado por Dib (2009). O gráfico da figura 2.24 mostra o perfil de temperatura registrado pelos termopares da placa absorvedora e das paredes externas. As temperaturas registradas nesse gráfico mostram a diferença entre a temperatura ambiente e a média de temperatura registrada pelos termopares da parede externa, da parede interna, do ambiente interno, do ambiente interno e de parede interna, e também entre a temperatura ambiente e o termopar do absorvedor. Segundo o autor, a queda de temperatura registrada pelo termopar 1, a partir de aproximadamente 13 horas do horário solar, foi devida ao aumento de nuvens.

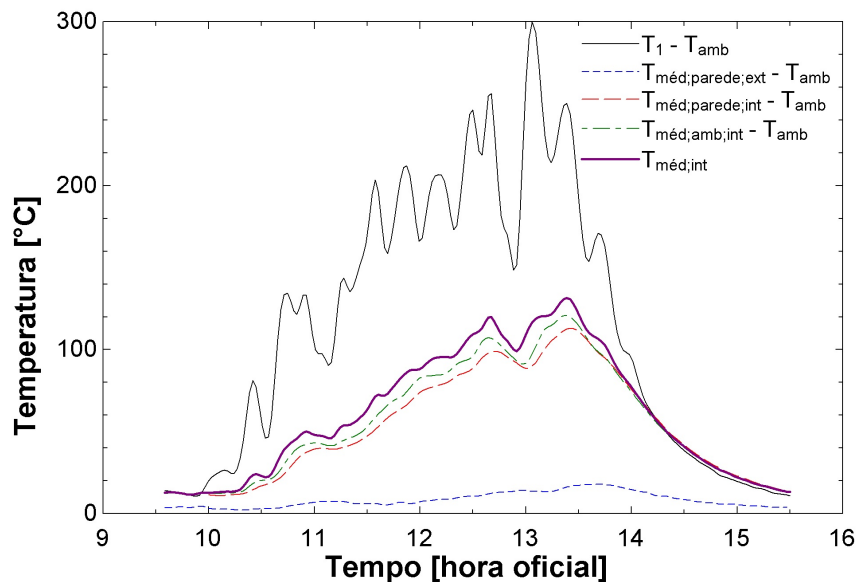


Figura 2.24 – Perfil de temperaturas do receptor forno. Dib (2009).

O piranômetro utilizado estava distante do concentrador solar, e as nuvens fizeram sombras nos dois lugares em tempos diferentes de modo que as curvas de incidência de irradiância solar tivessem correlação que dificultaria os cálculos para análise térmica.

Portanto, a radiação solar total absorvida no forno, $\dot{S}S$, foi calculada como uma função do calor retido pelo forno, $\dot{M}U$, das perdas térmicas, \dot{Q}_l , e do fluxo de entalpia, devido ao pequeno vazamento de ar por falhas na vedação, $\dot{m}h$. Essas variáveis foram calculadas em função das propriedades térmicas dos materiais e das temperaturas registradas pelos termopares.

A figura 2.25 apresenta a curva da temperatura do absorvedor (T1), e de $\dot{M}U$, \dot{Q}_l , $\dot{m}h$ e $\dot{S}S$. Nota-se que, a partir da linha que divide as etapas de aquecimento e resfriamento, os valores de $\dot{S}S$ são nulos. A curva de $\dot{m}h$ pode ser considerada insignificante em vista das outras variáveis. A baixa correlação entre as curvas de temperatura T1 e a energia

absorvida pelo receptor, $\dot{S}S$, pode ser explicada pelas perdas óticas e radiosidade do absorvedor.

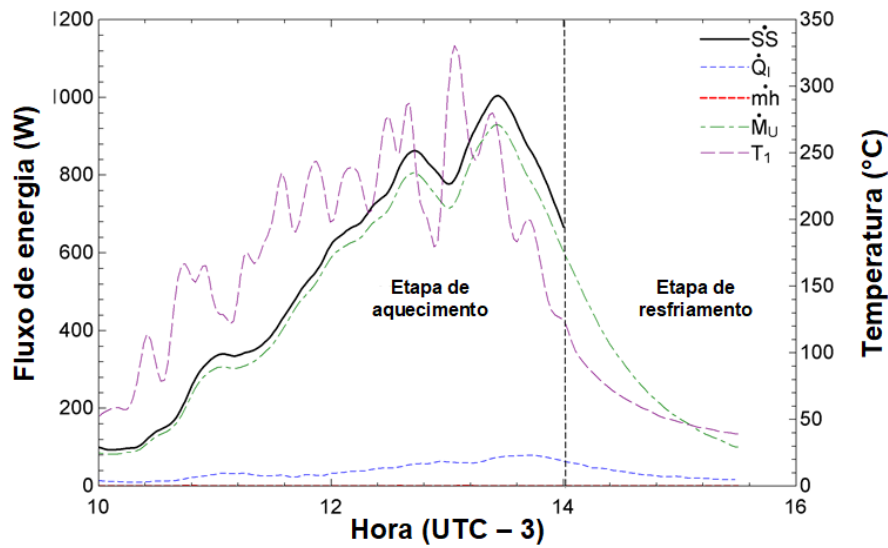


Figura 2.25 – Curvas da temperatura do absorvedor (T_1), de calor do forno (\dot{M}_U) das perdas de calor (\dot{Q}_i), do vazamento de ar (entalpia) ($\dot{m}h$) e da radiação solar total absorvida no absorvedor, ($\dot{S}S$) (DIB et al., 2020).

O índice de brilho, k_T é uma estimativa da interferência da atmosfera sobre a radiação solar. O índice k_T é definido pela razão $k_T = I/I_o$, onde I é a irradiação medida pelo piranômetro e I_o é a radiação solar extraterrestre, calculada em função da declinação solar. A figura 2.26 apresenta as curvas do k_T e da diferença de temperatura média do forno, $T_{av;oven}$, com a temperatura ambiente, T_∞ , utilizada para cálculo da constante de tempo, t_o , que é o intervalo de tempo entre $(T_{av;oven} - T_\infty)$ e o ponto da curva cujo valor é igual ao termo $(T_{av;oven} - T_\infty)/e$.

O fator de perdas globais calculado foi de $F'U_L = 3,937 \text{ kW/m}^2$ para $t_o = 3888 \text{ s}$. O fator de eficiência ótica máximo foi de $F'\eta_o = 0,852$, no intervalo entre 10 h 05 min e 11 h, e o mínimo foi de $F'\eta_o = 0,302$ e $\eta_t = -0,09$ no intervalo entre 13 h e 14 h. A eficiência térmica variou entre 0,349 e 0,042 nos intervalos entre 13 h e 13 h 25 min e entre 12 h e 13 h, respectivamente (DIB et al., 2020).

O trabalho de Senthil e Cheralathan (2016) apresenta uma análise térmica de um sistema de aquecimento de fluido térmico com um concentrador solar Scheffler de $A_S = 16 \text{ m}^2$ e um receptor cilíndrico. O objetivo do arranjo experimental era aquecer óleo térmico. Água era aquecida no receptor, pelo concentrador Scheffler, e o calor era transferido para o óleo térmico no tanque (figura 2.27).

Os autores experimentaram duas configurações de fluxo da água no ciclo: passagem única (PU) e recirculação (PR). As variáveis medidas foram fluxo mássico, \dot{m} , pressões de entrada, P_1 , e de saída, P_2 , temperaturas de entrada, T_e , de saída, T_s , do ambiente

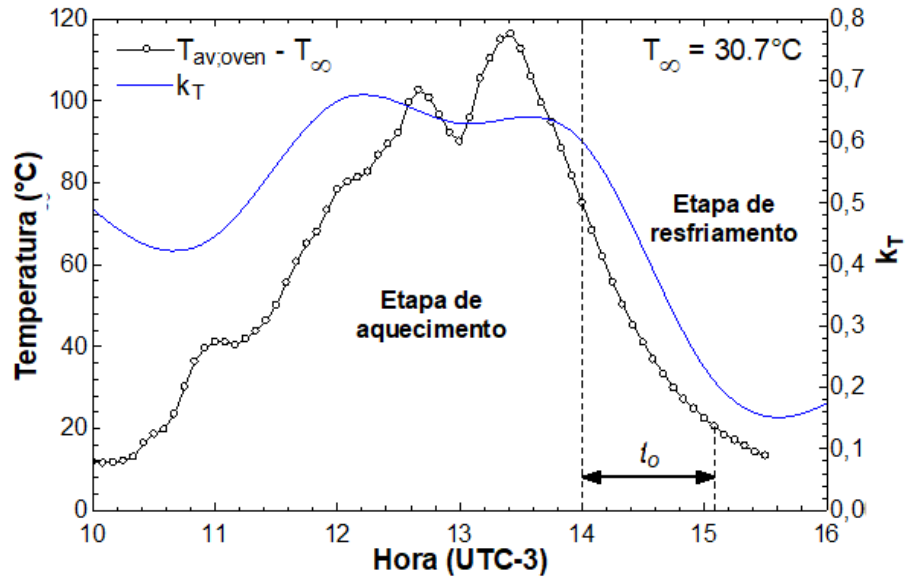


Figura 2.26 – Curvas da diferença entre a temperatura média do forno e a temperatura ambiente ($T_{av,oven} - T_{\infty}$ e do índice de brilho (k_T). A constante de tempo foi de $t_o = 3888\text{s}$ (DIB et al., 2020).

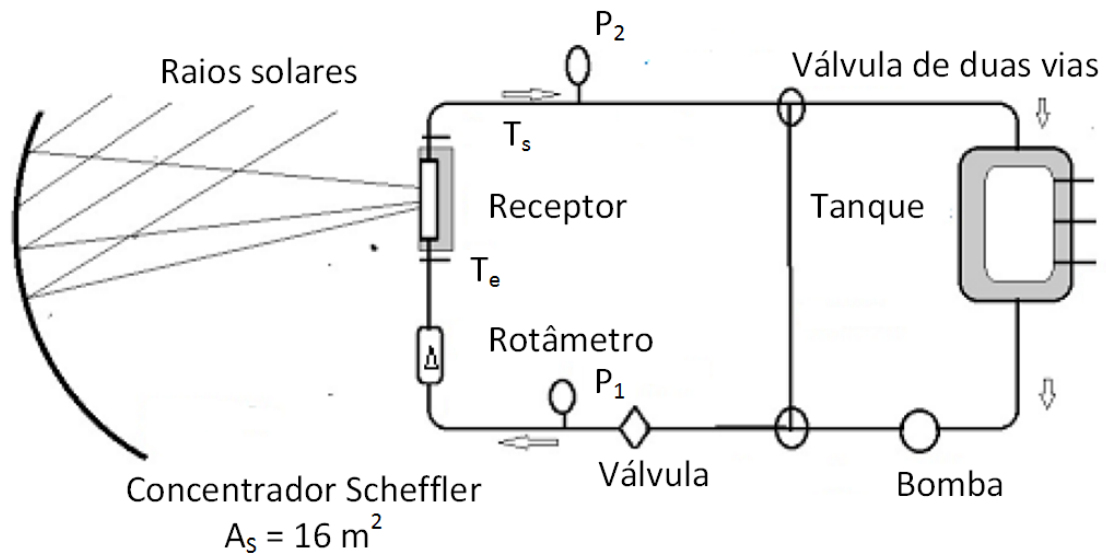


Figura 2.27 – Esquema de aquecimento via concentrador solar Scheffler no trabalho de Senthil e Cheralathan (2016).

externo, T_{∞} , da parede do absorvedor, T_{abs} . A radiação solar e velocidade do vento também foram medidos.

Segundo os autores, os testes foram realizados em fevereiro e março, na latitude de $+13,5^{\circ}$ – Inverno de Chennai (Índia). A faixa de irradiação solar, I_b , durante o teste foi de 550 a 750 W/m^2 . O fluxo mássico foi regulado por meio das válvulas, cujos ajustes foram $\dot{m} = 75, 100$ e 125 kg/h .

Conforme Senthil e Cheralathan (2016), o receptor era um reservatório cilíndrico,

cujo diâmetro da base media 406 mm, o comprimento, 80 mm, e a espessura de 5 mm, feito com aço de baixo carbono. A razão de concentração variou de 80 a 100 no período dos testes. Este receptor foi instalado perpendicularmente com o eixo de rotação diário.

No ensaio configurado para RP, assim como em PU, a menor vazão mássica apresentou o maior ganho útil. Mas, a vazão intermediária demonstrou as maiores temperaturas de parede do absorvedor. Nesta configuração de fluxo, as perdas térmicas foram maiores devido ao maior tempo de permanência do fluido no receptor pela recirculação. Também por isso, a variação de temperatura entre T_s e T_e diminui, dizem os autores.

Conforme demonstrado por Senthil e Cheralathan (2016), a eficiência térmica decresce com o aumento do fluxo em PU, mas cresce em PR. A maior eficiência térmica verificada foi $\eta_t = 0,46$ em PU com $\dot{m} = 75$ kg/h. Na mesma figura nota-se que a eficiência exergética decresce com o aumento da vazão em PU e cresce ligeiramente na regulagem com recirculação. A maior eficiência exergética foi em PU, com o valor de $\eta_x = 0,087$, conforme os autores. Para a configuração em recirculação, as eficiências térmica e exergética foram, respectivamente, 0,43 e 0,047.

Para o preaquecimento, Senthil e Cheralathan (2016) testaram um óleo térmico trocando calor com a água do sistema do coletor solar Scheffler. Verificaram que a potência máxima foi de 500 W, na regulagem PU, e 800 W, na regulagem PR. As perdas por convecção e radiação em PU foram 62% menores que em PR.

Ruelas, Velázquez e Cerezo (2013), Ruelas et al. (2014) e Ruelas, Palomares e Pando (2015) realizaram uma análise comparativa entre os desempenhos térmicos de um coletor solar Scheffler cujo receptor foi acoplado em um motor Stirling. Os autores também propuseram um modelo para cálculo do fator de interceptação com considerações ópticas e geométricas do concentrador solar Scheffler. O trabalho foi realizado em Mexicali, México, cuja latitude é de 32,65°N.

Ruelas, Velázquez e Cerezo (2013) optaram por não utilizar o valor da inclinação típica da seção do concentrador solar Scheffler, de 43,23°. Portanto, houveram diferenças estruturais. A geometria do receptor era em cavidade onde havia um absorvedor tubular. Nestes tubos circulava fluido térmico do motor Stirling, conforme indicação na figura 2.28, que elucida que a radiação solar passava através da abertura da cavidade e incidia nos tubos de forma direta e pelos efeitos internos da cavidade.

A figura 2.29 mostra as curvas do fator de interceptação γ , energia útil Q_u , energia térmica no absorvedor Q_{abs} , energia perdida por convecção Q_{conv} e por radiação térmica Q_{rad} em função do diâmetro do receptor, D_o . Na curva de Q_u , o ponto máximo definiu o valor para $D_o = 0,36$ m. O fator de interceptação para este diâmetro foi de $\gamma = 0,98$.

Ruelas, Velázquez e Cerezo (2013) realizaram uma comparação entre o concentrador Scheffler e outro concentrador parabólico (tabela 2.2). Os concentradores solares foram

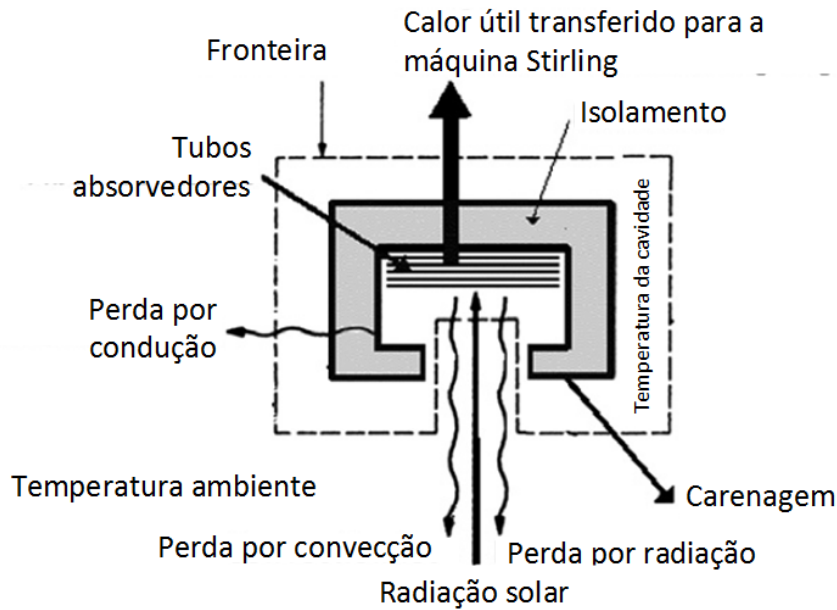


Figura 2.28 – Receptor em cavidade com parâmetros da modelagem do fenômeno térmico do sistema de Ruelas, Velázquez e Cerezo (2013). (Adaptado)

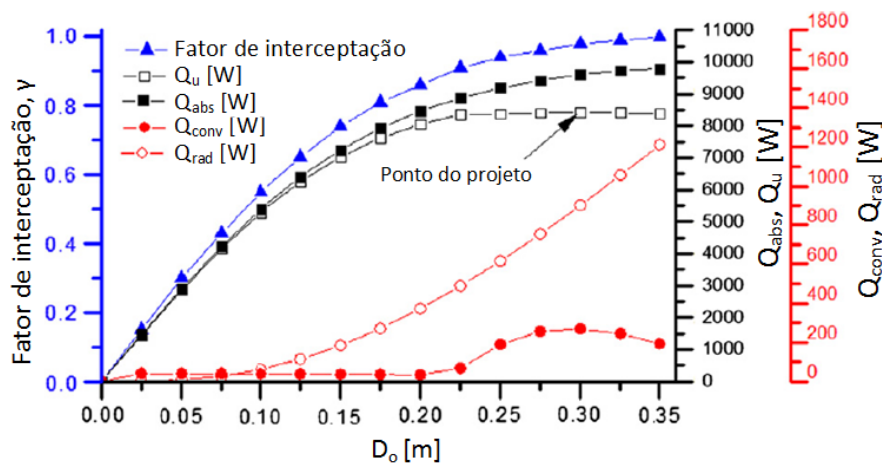


Figura 2.29 – Curvas em função do diâmetro do receptor, D_o , para o fator de interceptação γ , energia útil Q_u , calor para o absorvedor Q_{abs} , calor perdido por convecção Q_{conv} e por radiação térmica Q_{rad} . Ruelas, Velázquez e Cerezo (2013).

dimensionados para uma máquina Stirling de 3 kWe, ou 8423 W térmicos. O raio da área de abertura circular do concentrador Scheffler foi de 1,96 m. A inclinação do receptor (ou cavidade) para o concentrador solar Scheffler se manteve fixo em $80,7^\circ$, enquanto que a inclinação do receptor do concentrador simétrico, necessariamente, acompanha o sistema de rastreamento do conjunto. Foi definido que a borda inferior do concentrador Scheffler ficaria distante em 0,25 m do eixo da parábola, enquanto que o ângulo de borda superior $\chi_b = 45^\circ$.

Segundo Ruelas, Velázquez e Cerezo (2013), o coletor Scheffler apresentou maior eficiência térmica no receptor que o coletor simétrico devido à inclinação ser diferente

entre estes. No coletor simétrico, o ângulo de inclinação do receptor, β , favoreceu a perda por convecção na cavidade, mesmo com menores γ e σ_t .

A formação da imagem foi analisada em Ruelas et al. (2014), pelo método de *Ray Tracing*, que simula o caminho feito por n feixes de radiação solar desde a fonte até o a zona focal. Os dados dimensionais considerados foram os mesmos da tabela 2.2, com o receptor acoplado ao motor Stirling de 3 kWe, e, na cavidade, o absorvedor era formado por 32 tubos com diâmetro externo de 0,63 cm cada onde aquecia gás. A cavidade tinha área $A_{cav} = 644\text{cm}^2$.

Os autores realizaram duas simulações, uma em cada solstício, $\delta = +23,5^\circ$ e $\delta = -23,5^\circ$). As figuras 2.30 e 2.31 mostram os estudos de Ruelas et al. (2014) com *Ray Tracing*. A primeira ilustra a incidência dos feixes no refletor, e a segunda, na zona focal.

Pela observação das imagens dos trabalhos de Ruelas, Velázquez e Cerezo (2013), Ruelas et al. (2014) e Ruelas, Palomares e Pando (2015) e pelo local de construção (hemisfério Norte) é provável que o concentrador Scheffler construído tenha sido no lado Sul em relação à zona focal (Scheffler Sul). Então, pode ser concluído que as figuras 2.30a e 2.31a são referentes ao Solstício do verão mexicano ($\delta = +23,5^\circ$). As imagens 2.30b e 2.31b são simulações para o Solstício de Inverno ($\delta = -23,5^\circ$). A seção 3 expõe as variações decorrentes do posicionamento do concentrador Scheffler direcionado para o Norte e para o Sul.

Duas análises teóricas de formação de imagem focal foram comparadas. As figuras 2.32a e 2.32b são resultados da formação da imagem focal com *Ray Tracing* para software CAD e método *Monte Carlo Ray Tracing* (MCRT), respectivamente.

Tabela 2.2 – Comparação entre coletor solar concentrador simétrico e Scheffler com receptor com motor Stirling (RUELAS; VELÁZQUEZ; CERESO, 2013).

Parâmetros	Parabólico simétrico	Scheffler
Diâmetro do refletor	4 m	3,92 m
Ângulo de borda	45°	45°
Comprimento de foco	2,6 m	5,04 m
Diâmetro do receptor	0,36 m	0,36 m
Diâmetro de abertura do receptor (d_o)	0,15 m	0,3 m
Comprimento da cavidade	0,125 m	0,057 m
Inclinação da cavidade	40°	80,7° fixo
Erro total de reflexão (σ_t)	8 mrad	12 mrad
Fator de interceptação γ	0,99	0,98
Radiação interceptada	10301 W	9597 W
Calor ao fluido (Q_u)	8423 W	8423 W
Eficiência do receptor	0,81	0,88

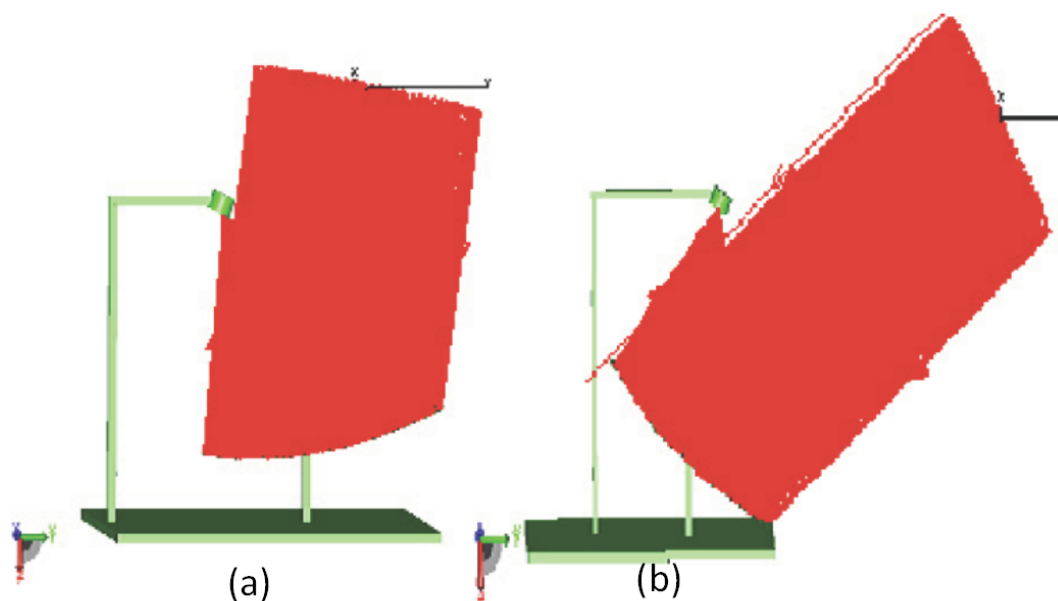


Figura 2.30 – Resultados do estudo em *Ray Tracing* incidente no refletor nos dois solstícios (RUELAS et al., 2014).

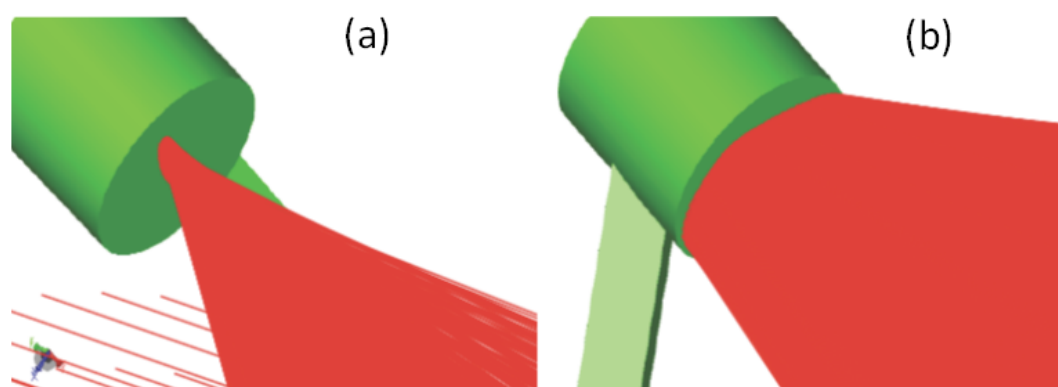


Figura 2.31 – Resultado no estudo de *Ray Tracing* incidente na zona focal nos dois solstícios (RUELAS et al., 2014).

Segundo os autores, o resultado na figura 2.32b foi 1,36 maior que a figura 2.32b. Esta diferença foi associada aos fatores óticos mais bem configuráveis em 2.32b.

Ruelas, Palomares e Pando (2015) instalaram uma placa de aço na zona focal do concentrador solar para projeção da imagem. Uma câmera termográfica foi utilizada para captura da imagem focal (figura 2.32c).

Ruelas, Palomares e Pando (2015) analisaram comparativamente as imagens focais teórica e capturada. A figura 2.32b teve o fluxo máximo de irradiância de $1,3 \times 10^6 \text{ W/m}^2$, a média de $42,7 \times 10^3 \text{ W/m}^2$, para um fluxo total de 4554 W em 4554 feixes lançados. A figura 2.32c a incidência de radiação solar direta, no plano de abertura do concentrador solar Scheffler, foi de 900 W/m^2 .

As figuras 2.33a e 2.33b são sobreposições dos resultados de Ruelas, Palomares e

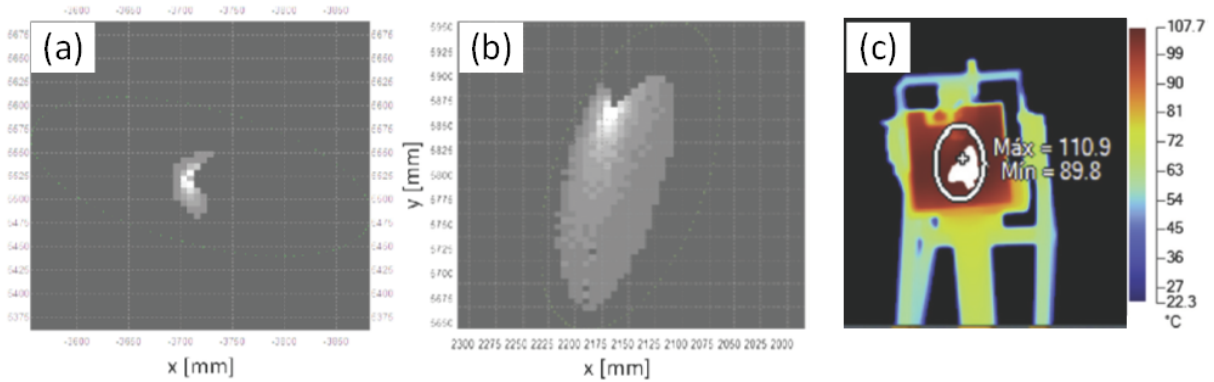


Figura 2.32 – Resultados das análises em (a) *Ray Tracing* no CAD (RUELAS et al., 2014), (b) em MCRT (RUELAS; PALOMARES; PANDO, 2015) e (c) imagem focal capturada com câmera termográfica. (Adaptado)

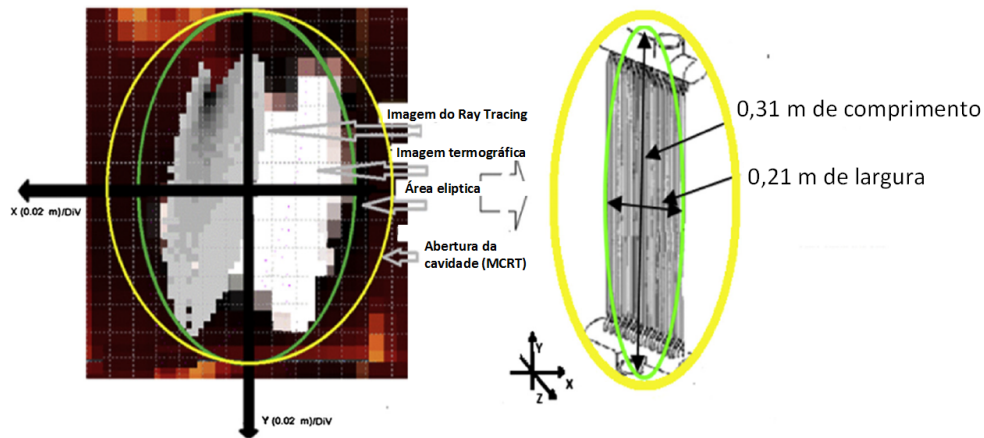


Figura 2.33 – À esquerda: sobreposição das imagens da câmera termográfica, em branco, do aplicativo de *Ray Tracing*, cinzenta, do resultado do MCRT, linha amarela, e da região com maior incidência, linha verde. À direita: resultado do MCRT, que é a abertura da cavidade, em linha amarela, e a região com maior incidência sobre os tubos do absorvedor, em linha verde.

Pando (2015), das imagens produzidas pelo MCRT (figura 2.32b e pela câmera termográfica. Na figura 2.33a as imagens focais estão sobrepostas. A imagem de pixels maiores é a da câmera, e a de pixels menores, a do MCRT.

A figura 2.33b mostra o absorvedor instalado na cavidade do receptor. A linha elíptica verde foi considerada como a região de maior fluxo de radiação solar concentrada, e a amarela, a abertura do receptor. As dimensões foram 0,31 m no diâmetro maior e 0,21 m para o diâmetro menor. A área da imagem focal foi $A_f = 511,3 \text{ cm}^2$.

Um sistema de torrefação de soja foi testado por (RAZA et al., 2019). Para o aquecimento, foi instalado um coletor solar Scheffler com área da elipse $A_S = 10 \text{ m}^2$ e o absorvedor era uma serpentina espiral feita com tubo de cobre. O óleo térmico circulava entre o receptor e a unidade de torrefação. A unidade de torrefação era cilíndrica. No lado interno da carenagem do cilindro havia uma rosca que, com o giro do cilindro, era levada até a saída, no recipiente, como indicado por B7, na figura 2.34.

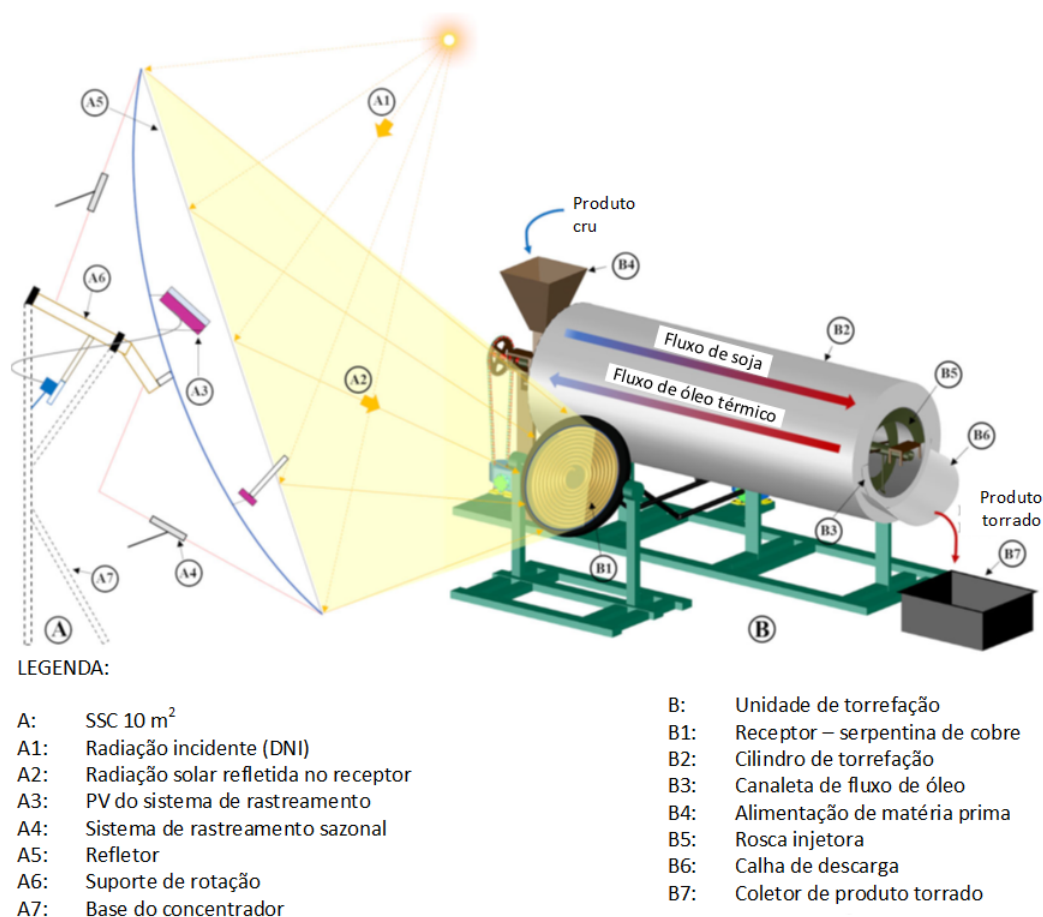


Figura 2.34 – Esquema da bancada experimental de Raza et al. (2019) (Adaptado).

A soja entrava no cilindro pelo funil e a rosca interna do cilindro a espalhava pelo interior da unidade de torrefação. A soja permanecia na unidade de torrefação por um tempo predeterminado. A temperatura de torrefação foi ajustada para o intervalo de 140°C e 160°C. O fluido térmico trocava calor na unidade de torrefação em contracorrente, conforme indicação na figura 2.34. A vazão do sistema foi ajustada de modo que a temperatura de saída do óleo térmico fosse 140°C. Quando a temperatura do óleo térmico, na entrada da unidade de torrefação, ultrapassava 160°C, uma válvula solenoide modificava o curso do fluido térmico para um reservatório, cujo calor acumulado era usado para estender o tempo de funcionamento da unidade.

Conforme Raza et al. (2019), num teste com a incidência de radiação solar direta entre 600 e 800 W/m², a temperatura do fluido térmico, aquecido pelo concentrador solar Scheffler, atingiu 160°C antes das 10 horas. Depois desse horário manteve-se na faixa de 220°C a 240°C até às 14 h 30 min, com a incidência de radiação solar direta média, neste intervalo, de 750 W/m². O tempo e a temperatura de torrefação otimizados foi de 29 min e 160°C. Segundo a publicação, neste teste, foi possível utilizar o equipamento de torrefação por 5 horas/dia com produção de 100 kg de soja torrada.

Venkatachalam e Cheralathan (2019) realizaram uma análise experimental compa-

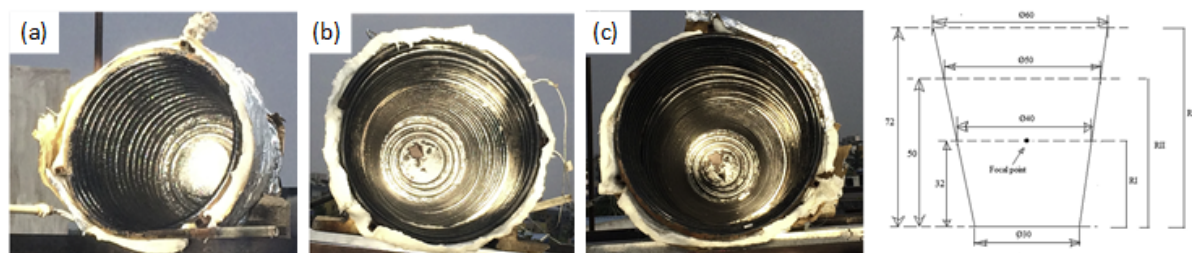


Figura 2.35 – Receptores RI, RII e RIII com relação H/D de (a) 0,8, (b) 1,0, e (c) 1,2, respectivamente, e as medidas absolutas. Adaptado de Venkatachalam e Cheralathan (2019).

rativa de cavidades cônicas truncadas para o concentrador solar Scheffler de $A_s = 16 \text{ m}^2$. O absorvedor de geometria cônica foi formada por serpentina. O tubo utilizado foi de aço de $d_i = 14,3 \text{ mm}$ e espessura de parede de 3 mm . Foram construídos três receptores com diferentes relações de H/D, onde H é profundidade do cone e D é o diâmetro da abertura do cone. As relações H/D eram 0,8, 1,0 e 1,2, representadas, respectivamente pelas figuras 2.35)a (RI), b (RII) e c (RIII).

O desenho esquemático à direita da figura 2.35) mostra a relação dimensional dos absorvedores. O ângulo do cone e o diâmetro do fundo foi o mesmo para as três serpentinas. A abertura e a altura foram 0,4, 0,5 e 0,6 e 0,32, 0,50 e 0,60, respectivamente. O ciclo de aquecimento era fechado e sem etapa de resfriamento do fluido térmico. O fluido era água e foi evitado que a temperatura fosse além de 100°C para não gerar vapor.

As comparações entre os receptores foram com referência nas variáveis: fator de perda global de calor e eficiências térmica e exérgica. Os testes foram realizados em dias distintos, mas com valores de incidência de radiação solar direta próximos de 600 W/m^2 . Para os cálculos de área de abertura do concentrador solar, Venkatachalam e Cheralathan (2019) usaram as considerações de Munir, Hensel e Scheffler (2010), $A_{ap,n} = A_s \cos(43,23^\circ + \delta/2)$. A área de abertura do concentrador Scheffler é uma variável dependente da declinação solar. Isso está mais bem detalhado na seção 3.

Segundo Venkatachalam e Cheralathan (2019), os picos de temperatura em RI, RII e RIII foram de 136°C , 113°C e 103°C , respectivamente. As eficiências térmicas média e máxima foram de 0,57 e 0,67 para RI, 0,44 e 0,53 para RII e 0,46 e 0,70 para RIII. As eficiências exérgicas média e máxima foram de 0,059 e 0,104 para RI, 0,054 e 0,089 para RII e 0,058 e 0,088 para RIII. A maior eficiência térmica instantânea foi apresentada por RIII, atribuído, pelos autores, pelo fato de nos primeiros dez minutos RIII ter apresentado a maior diferença de temperatura no fluido térmico entre a entrada e saída do receptor. Depois desse tempo, houve uma queda brusca na diferença e as perdas térmicas aumentaram.

A conclusão de Segundo Venkatachalam e Cheralathan (2019) foi que, entre os três receptores, quanto menor for a área da cavidade, maior é a eficiência térmica e exérgica do receptor, e quanto maior for a área de contato entre o a radiação solar do foco e

o absorvedor, menor é a concentração de energia, menor é a temperatura e maior é a exposição para perdas térmicas. O receptor com a menor relação H/D apresentou o melhor desempenho térmico.

2.2 TABELA COMPARATIVA ENTRE OS TRABALHOS REALIZADOS

Os sistemas com concentradores solares Schefflers, revisados na seção anterior apresentaram diferentes possibilidades de aplicações, conforme relacionadas na tabela 2.3. Os sistemas montados tiveram aplicações para cozinha comunitária, padaria, armazenamento térmico, produção de xarope de agave, extração de óleos essenciais, crematório, esterilizador hospitalar, destilação de água, geradores de vapor em ciclos industriais e motor Stirling.

A tabela 2.4 relaciona os dados dimensionais, térmicos e óticos dos concentradores solares. Foi visto que alguns trabalhos foram realizados com mais de um concentrador solar, e, em parte destes, dois concentradores solares para um receptor ($n_s = 2$). A análise feita na seção 3 detalha que o uso de dois concentradores Scheffler para um único receptor, p.e. geradores de vapor de Lukhi (2009) e Gadhia (2009), estabiliza as variações dimensionais provocadas pelo funcionamento do sistema de rastreamento sazonal, que deforma a superfície refletiva.

Outras instalações, entretanto, utilizam um refletor secundário, cuja função é redirecionar a energia concentrada para um absorvedor instalado (ou que faça parte) de um recipiente, tanque, ou capacitor térmico, como as cozinhas solares como a de Oelher e Scheffler (1994), Patil, Awari e Singh (2011), Nyahoro, Johnson e Edwards (1997) e outros (tabela 2.3). Nesta configuração, todos utilizam um concentrador solar, exceto Bhirud e Tandale (2006), que construíram um receptor com um refletor secundário para cada concentrador.

A área da elipse dos concentradores construídos variam entre 2,7 m² (DIB, 2009) e 16 m² (GADHIA, 2009; CHANDAK; SOMANI, 2009; SENTHIL; CHERALATHAN, 2016). A projeção de A_s em um plano perpendicular à incidência de radiação solar é a área de abertura, A_{ap} . A relação entre as áreas é $A_S = A_{ap} \cos(43, 23^\circ \pm \delta/2)$, sendo o δ a declinação solar. Portanto, A_{ap} é dependente da data do teste.

A razão de concentração geométrica no dia n , C_n , é definida em Goswami, Kreith e Kreider (2000), Duffie e Beckman (2013) e Kalogirou (2014) como a razão da área de abertura, A_{ap} , pela área da imagem formada, A_f .

O concentrador de Ries e Schubnell (1990), que não é do tipo Scheffler, apresentou $C_n = 18394$. O crematório de Scheffler (2006a) possuía $C_n = 676$. A consideração dos

autores, ao invés de A_f , foi a área plana da abertura da cavidade. Outros trabalhos apresentaram razões de concentrações geométricas em torno de $C_n = 100$. As seções 3.2 e 6.1 demonstram que o valor ideal de C_n para o concentrador Scheffler pode atingir a ordem de 10^3 , e também é uma função de δ .

A razão de concentração em termos de energia é considerada no fator de interceptação, γ . Ruelas, Velázquez e Cerezo (2013), Ruelas et al. (2014), Ruelas, Palomares e Pando (2015) propuseram uma equação para γ do concentrador solar Scheffler cujo corte inclinado em relação à diretriz de um parabolóide virtual era diferente de $43,23^\circ$. O cálculo dos autores tinha o objetivo de projetar um receptor em cavidade acoplado em motor Stirling, cujo calor útil, Q_u , foi de $8,4 \text{ W/m}^2$, consideravelmente acima dos demais.

O concentrador solar Scheffler mostra ser aplicável em todas as faixas de temperatura na figura 1.3. O crematório de Scheffler (2006a) atingiu 900°C . Com um concentrador solar de $A_s = 10 \text{ m}^2$, a temperatura do receptor do sistema de Tyroller (2006) ultrapassou 500°C em quase 7 horas de trabalho. Obviamente, a temperatura máxima depende do fluxo térmico do receptor.

Os valores das eficiências térmicas, η_t , variaram entre $\eta_t = 0,12$ e $\eta_t = 0,61$. A publicação de Dib et al. (2020), que analisou uma aplicação em condições climáticas adversas, apresentou $\eta_t = 0,04$. Conforme a publicação, isso ocorreu devido ao aumento de nuvens antes do final do período considerado para este dado. No mesmo trabalho, em outro intervalo de tempo, a eficiência térmica foi de $0,35$. No esterilizador de Tyroller (2006), para temperatura de 250°C a eficiência foi $\eta_t = 0,61$. Diferença entre receptores.

O fator de eficiência ótica é uma função da temperatura, incidência de radiação solar, geometria do receptor e área de abertura do concentrador solar. No sistema estudado por Dib et al. (2020), $F'\eta_o$ variou entre $0,3$, para os períodos cujas condições climáticas eram menos favoráveis, e $0,81$, para condições mais favoráveis. O sistema instalado por Bhirud e Tandale (2006) na temperatura de 150°C apresentou variações de $F'\eta_o$ entre $14,4$ e $17,5$, conforme a espessura do material colocado nesse forno.

Entre os trabalhos sobre aplicações do concentrador solar Scheffler, poucos apresentam análise de receptor, em função da imagem do foco. Há uma oportunidade para ser desenvolvido um método para dimensionamento de receptores em função das variações da imagem. Este trabalho propõe um modelo para auxílio na definição diâmetro de abertura de absorvedores, para que a eficiência térmica e ótica sejam aumentadas. O capítulo 4 propõe os modelos para definição do núcleo e da fronteira da imagem, bem como a variação em função do sistema de rastreamento sazonal.

Tabela 2.3 – Aplicações dos concentradores solares Schefflers revisados

Autor	Refletor secundário	Receptor	Aplicação
Oelher e Scheffler (1994)	Sim	Placa plana	Cozinha comunitária
Nyahoro, Johnson e Edwards (1997)	Sim	Bloco cilíndrico de ferro fundido ou granito	Teste de ebulição de 50 litros de água
Gotz (2003)	Não	Bloco cilíndrico	Armazenamento térmico para uso noturno
Scheffler (2006a)	Não	Cavidade em câmara de combustão	Crematório
Tyroller (2006)	Não	Bloco de ferro com passagem interna de fluido	Ciclo térmico para esterilizador
Bhirud e Tandale (2006)	Sim	Forno com absorvedor plano	Aquecimento de placas metálicas
Lukhi (2009) e Gadhia (2009)	Não	Reservatório cilíndrico	Ciclo térmico líquido-vapor
Munir e Hensel (2009) e Munir e Hensel (2010)	Sim	Chapa metálica	Extração de óleo de essência de plantas aromáticas e medicinais
Schapers (2009)	Sim		Produção de xarope de agave
Muller e Arias (2009)	Não	Absorvedor em placas zig zag com armazenamento térmico	Forno para assar pães

Continua ▼

Tabela 2.3 – Aplicações dos concentradores solares Schefflers revisados (continuação)

Autor	Refletor secundário	Receptor	Aplicação
Chandak e Somani (2009)	Não	Reservatório cilíndrico	Sistema térmico multiestágio para destilação de água
Chandrashekara e Yadav (2017)	Não	Placa rugosa com cobertura de grafite exfoliado expansível de um lado (absorvedor), e tubos de alumínio de outro	Sistema de aquecimento indireto para dessalinização de água
Patil, Awari e Singh (2011)	Sim	Recipiente com água	Cozinha solar
Senthil e Cheralathan (2016)	Não	Reservatório cilíndrico	Preaquecimento de fluido térmico
Raza et al. (2019)	Não	Serpentina espiral	Torrefação de soja
Ruelas, Velázquez e Cerezo (2013), (RUELAS et al., 2014) e Ruelas, Palomares e Pando (2015)	Não	Receptor em cavidade com absorvedor tubular	Motor Stirling
Venkatachalam e Cheralathan (2019)	Não	Cavidade cônica feita de serpentina	Aquecimento de fluido térmico
Dib (2009), Santos et al. (2014), Dib et al. (2020)	Não	Placa plana	Forno

■

Tabela 2.4 – Dados térmicos e óticos dos concentradores solares tipo Scheffler.

Autor	n_s	A_{ap} (m ²)	A_S (m ²)	A_f (cm ²)	C_n	Temp. (°C)	η_t	$F'\eta_o$	q_u (kW)
Ries e Schubnell (1990)		52		2827	18394 ²				17
Oelher e Scheffler (1994)	1	5,1	7	2827			0,41 ³		1,4
Nyahoro, Johnson e Edwards (1997)	1			1662		de 430 a 570			
Gotz (2003)	1		8			300			
Scheffler (2006a)	1		3,4	50,27	676	900			1
Tyroller (2006)	1		10			de 250 a 400	de 0,61 a 0,42		
Bhirud e Tandale (2006)	2		10	2250	32,4	150	de 0,12 a 0,18 ⁴	de 14,4 a 17,5	0,3
Lukhi (2009) e Gadhia (2009)	2		10 e 16						
Munir e Hensel (2009) e Munir e Hensel (2010)	1		8			de 300 a 400	de 0,33 a 0,43		1,6
Schapers (2009)	1		10						
Muller e Arias (2009)	1					300	0,40		1,2
Chandak e Somani (2009)	1		16	1257	100	172			
Chandrashekara e Yadav (2017)	1	2	2,7			de 272 a 644	de 0,30 a 0,40		
Patil, Awari e Singh (2011)	1		8				0,2131		1,3

Continua ▼

² Calculado com dados apresentados no trabalho do autor $C_n = 52/(28,27 \times 10^{-4})$ ³ Calculado com dados do autor: $\eta_t = q_u/(I_b A_{ap}) = 1400/(730 \times 4,7)$, para $I_b = 730 \text{ W/m}^2$ ⁴ A eficiência diminuiu com o aumento da carga do forno.

Tabela 2.4 – Dados térmicos e óticos dos concentradores solares tipo Scheffler (continuação)

Autor	n_s	A_{ap} (m ²)	A_S (m ²)	A_f (cm ²)	C_n	Temp. (°C)	η_t	$F'\eta_o$	q_u (kW)
Senthil e Cheralathan (2016)	1		16	1295	100		de 0,43 a 0,46		0,8
Raza et al. (2019)	1		10			de 350 a 450			
Ruelas, Velázquez e Cerezo (2013), (RUELAS et al., 2014) e Ruelas, Palomares e Pando (2015)	1		12	511			0,88 ⁵	0,88 ⁶	8,4
Venkatachalam e Cheralathan (2019)	1		16			de 70 a 136	0,58		
Dib (2009), Santos et al. (2014), Dib et al. (2020)	1	2	2,7	120	166	338	de 0,04 a 0,35	de 0,30 a 0,81	

■

2.3 PERFIL DE FLUXO DE ENERGIA NA ZONA FOCAL

Alguns trabalhos revisados na seção 2.1, relacionados à otimização de receptores, apresentaram estudos sobre o perfil teórico do fluxo de radiação solar na imagem focal do concentrador solar tipo prato parabólico. A análise prévia do fluxo de energia da imagem focal auxilia no projeto do absorvedor pela otimização do fator de interceptação.

O receptor otimizado de Shuai, Xia e Tan (2008) foi definido pela geometria de superfície que apresenta menor diferença do espalhamento da radiação solar incidente na parede interna da cavidade. Para isso os autores utilizaram metodologia de *Ray Tracing*. Para inserir a informação da distribuição da radiação solar no plano de abertura da cavidade, localizado no plano focal do concentrador prato parabólico, foi realizado um

⁵ Eficiência térmica do receptor.

⁶ Eficiência térmica do receptor.

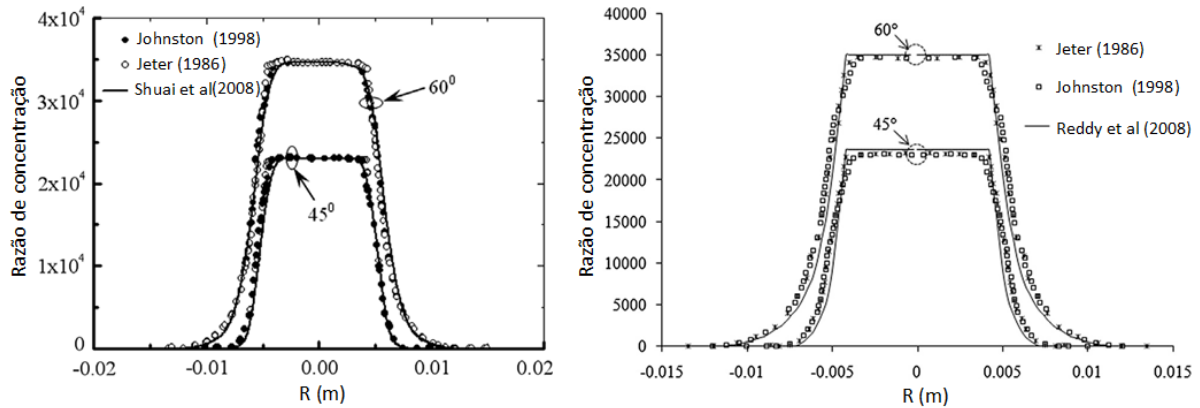


Figura 2.36 – Curvas do fluxo de radiação solar no plano do foco dos concentradores tipo prato parabólico com $f = 1$ e $\phi_r = 45^\circ$ e 60° de (a) Shuai, Xia e Tan (2008) e (b) Reddy, Natarajan e Veershetty (2015).

estudo prévio da distribuição da incidência de radiação solar refletida pelo concentrador solar, ilustrada na Figura 2.36a.

De acordo com Shuai, Xia e Tan (2008), a curva mostrada na Figura 2.36a foi obtida por meio da metodologia *Monte Carlo Ray Tracing*, que simula a reflexão de feixes a partir de uma fonte (*Ray Trace*) em grande número com limites predefinidos (MCRT). Nessa técnica, cada feixe refletido projeta a imagem do disco solar. Os autores consideraram as medições de Johnston (1998) para a distribuição da intensidade emissiva do disco solar.

O concentrador solar de Kaushika e Reddy (2000) teve diversos estudos analíticos sobre receptores para aquele tipo de concentrador solar. Reddy, Natarajan e Veershetty (2015) publicaram outro estudo em que o perfil teórico do fluxo de radiação solar na imagem focal foi realizado (Figura 2.36b). Para gerar a curva analítica, os autores utilizaram a metodologia de cone ótico.

A curva é centralizada em $R = 0$ (abscissa), que coincide com o foco nominal da parábola. A razão de concentração C_r (eixo das ordenadas) foi definida em ambos os trabalhos como $C_r = q/(G_{bT}A_{ap})$, onde A_{ap} é a área de abertura do concentrador solar, q é o fluxo de energia pontual e G_{bT} é a radiação solar direta(_b) no plano perpendicular à incidência T .

As curvas mostradas na Figura 2.36 são visualmente semelhantes. Para ambas, foi considerado concentrador solar de reflexão ideal, isto é, a variação angular da incidência de feixes refletida, θ_c é a mesma do Sol $\theta_s \approx 16' \approx 4,65 \text{ mrad} \approx 0,27^\circ$. As configurações do concentrador solar prato parabólico considerado por Shuai, Xia e Tan (2008) e Reddy, Natarajan e Veershetty (2015) para as Figuras 2.36a e 2.36b, respectivamente, foram $f = 1$ e ângulos de borda $\phi_r = 45^\circ$ e 60° . Ambos compararam o perfil de fluxo com os resultados de Jeter (1986) e Johnston (1998).

As imagens 2.37a e 2.37b da Figura 2.37 são estudos teóricos realizados a partir

das curvas das Figuras 2.36, com a consideração de concentrador solar real, com $\theta_c \geq \theta_s$. Devido à simetria desse tipo de concentrador solar e ao tempo de processamento das Figuras, é usual que seja plotado metade da curva com $R = 0$ no ponto do foco nominal da parábola.

Nas curvas da Figura 2.37a, geradas por *Ray Tracing*, Shuai, Xia e Tan (2008) consideraram um concentrador com $f = 1$ e $\phi_r = 45^\circ$. A curva com $\theta_c = 0$ corresponde ao concentrador perfeito. Para as outras curvas, foram considerados somente erros tangenciais, que ocorrem quando o feixe central do cone ótico, que é emitido pelo centro do disco solar, não atinge o ponto do foco nominal. Erros radiais, que ocorrem devido à variação do ângulo do cone ótico do feixe refletido foi desprezado. Os valores para θ_c não incluem o valor de θ_s , que é o meio ângulo do cone ótico em $16'$ proveniente do disco solar.

Nas curvas da Figura 2.37b, geradas por modelagem em cone ótico, Reddy, Natarajan e Veershetty (2015) consideraram o concentrador com $f = 0,96$ m e $\phi_r = 65^\circ$. Os erros considerados nesse estudo foram de forma generalizada, quer dizer, a variável θ_c considerava erros radiais, tangenciais, de alinhamento do concentrador, do sistema de rastreamento e outros. A curva com $\theta_c = 1,7^\circ$ corresponde ao concentrador solar em questão. O valor de θ_c considerado pelos autores inclui a abertura do cone ótico do disco solar, θ_s .

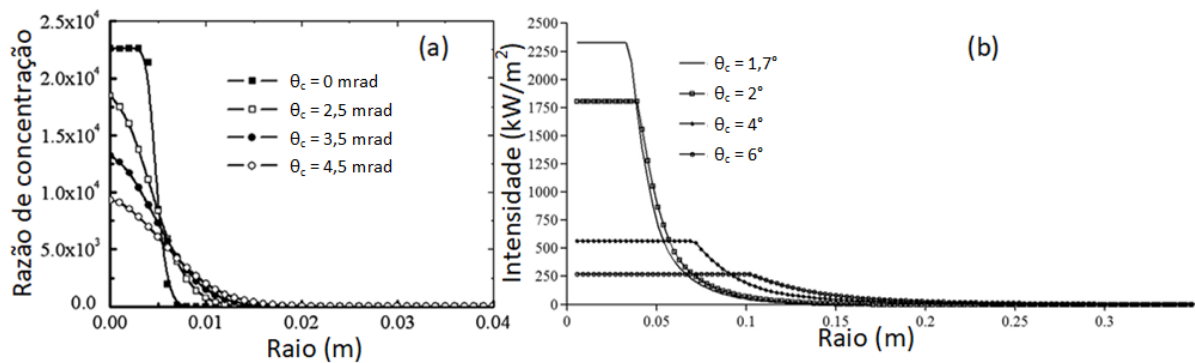


Figura 2.37 – Variação teórica do fluxo de radiação incidente na zona focal de (a) Shuai, Xia e Tan (2008) e (b) Reddy, Natarajan e Veershetty (2015). (Adaptado)

Os receptores de concentradores tipo prato parabólico devem ser instalados em congruência com o eixo da parábola, que é o eixo de simetria do refletor e normal à área de abertura. Portanto, a sombra do receptor é projetada no vértice da parábola, no centro do refletor. Alguns projetos de concentradores solares tipo prato parabólico possuem um furo circular no vértice do refletor, com o mesmo diâmetro do receptor. A curva vista na Figura 2.38 refere-se à curva de fluxo de energia solar na imagem formada por concentradores solares tipo prato parabólico com esse furo. O pico da curva refere-se à concentração máxima do fluxo no plano do foco, do feixe refletido pela borda do furo no refletor.

É visível a diferença entre os topos das curvas da Figura 2.37. Na Figura 2.37a,

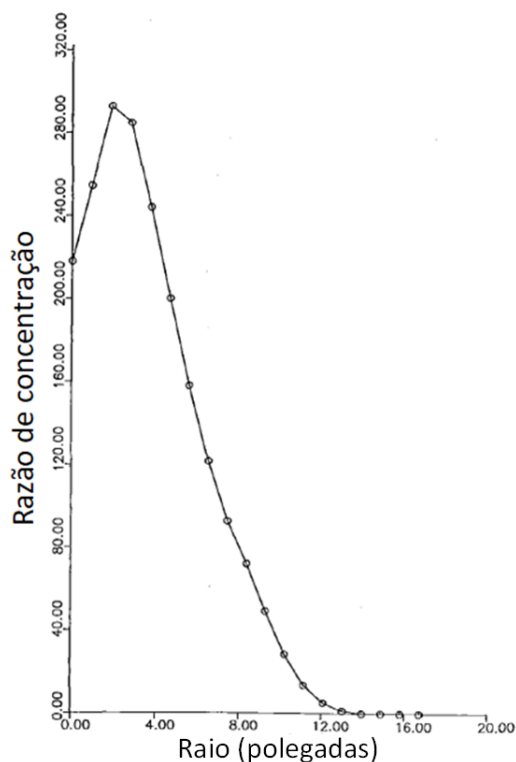


Figura 2.38 – Curva do fluxo focal de um concentrador tipo prato parabólico com receptor (JETER, 1986) (Adaptado).

com exceção do perfil para reflexão perfeita, foi feita uma distribuição de Gauss para as reflexões com erros tangenciais, que geraram o topo arredondado nas curvas. Na Figura 2.37b foi considerado que a totalidade dos erros de reflexão do concentrador produzem um θ_c médio para todos os feixes. Porém, o trabalho de Johnston (1998) mostrou que os erros de desvio de reflexão do concentrador solar não provocam alterações significativas no topo da curva do perfil de fluxo nem na região após o topo, onde o gradiente de fluxo de energia incidente é mais intenso, mas provoca um alargamento considerável nas regiões periféricas da imagem, na cauda da curva, onde a intensidade de fluxo é mais baixa.

A distribuição do fluxo incidente na imagem focal varia de acordo com a geometria dos espelhos do refletor e de acordo com o perfil de emissão de radiação do disco solar. Publicações clássicas, a respeito de estudos de perfil de emissão de radiação no disco solar, como, por exemplo em Jose (1957), desprezava-se os efeitos da auréola solar em imagens focais de concentradores solares. A auréola solar é um efeito provocado pela dispersão dos feixes de radiação solar pela atmosfera, portanto, é uma característica terrestre. Na ausência da atmosfera, o disco solar é mais bem definido, embora seja influenciado pela cromosfera. Mais tarde, com a melhora na sensibilidade dos sensores de imagem, as medições do perfil de emissão de radiação do disco e da auréola solar foram realizados (JOHNSTON, 1998; NEUMANN et al., 2002).

Jose (1957) realizou uma medição da intensidade de emissão de radiação em função

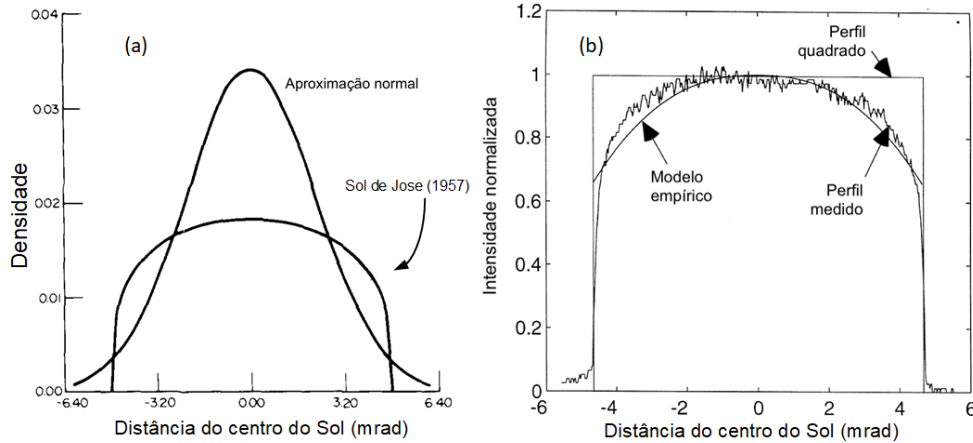


Figura 2.39 – Perfil de emissão de radiação do disco solar: (a) perfil gaussiano de Harris e Duff (1981) e (b) perfis de Sol quadrado (difuso), real e empírico de Johnston (1998).

do raio do disco solar. Nessa medição, as distâncias relativas do centro do disco solar até o limite da circunferência foram $\{0,00; 0,50; 0,75; 0,98; 1,00\}$ para as respectivas intensidades proporcionais dos feixes de $\{1,000; 0,934; 0,788; 0,490; 0,390\}$. Para diminuir o tempo de processamento computacional nos estudos de curva de fluxo focal Harris e Duff (1981) propuseram uma distribuição gaussiana para o perfil de emissão de radiação do disco solar com a mesma variância do Sol de Jose (1957). Observa-se, pela Figura 2.39a, que, embora a variância seja a mesma para ambos os modelos de Sol, a intensidade no topo da distribuição gaussiana é consideravelmente maior.

Johnston (1998) mediu o perfil de fluxo incidente na imagem focal de um concentrador solar tipo prato parabólico com $A_{ap} = 20 \text{ m}^2$, e comparou com a curva feita por *Ray Tracing*. Para verificar a diferença de curvas do algoritmo, foram considerados três perfis de emissão de radiação em função do raio do disco solar (Figura 2.39b): Sol difuso, com perfil quadrado ("Sol quadrado"); medição real e modelo empírico. Se o concentrador solar for formado por espelhos planos, a análise da formação de imagem com o modelo de "Sol quadrado" e com o perfil de Sol medido não apresentaram diferenças significativas entre resultados. Nas curvas das Figuras 2.37 e 2.38, p.e., Jeter (1986) considerou um perfil de Sol quadrado. Também foi verificado, pela análise de erros de reflexão com algoritmo de *Ray Trace*, que as regiões de gradiente mais intenso na curva de perfil de fluxo incidente tiveram variações insignificantes, e mantiveram-se próximas à curva do concentrador medido. A largura e o aspecto achatado do topo também foram mantidos, porém o fluxo foi menos intenso. Em compensação a essa diferença, a quantidade de fluxo na cauda da curva aumentou.

Mais tarde, Neumann et al. (2002) também realizaram medições do perfil de emissão do disco e da auréola solar com uma câmera desenvolvida no Centro Aeroespacial Alemão (DLR) em várias regiões da Europa com várias repetições. Foram 2300 medições, sendo 350 na plataforma solar de Almería (Espanha), 500 em Odeillo (França) e o restante em

Colônia (Alemanha). A auréola solar é resultado da dispersão da radiação solar direta pela atmosfera, portanto, a dimensão e a intensidade variam com as condições atmosféricas. A equação a seguir foi utilizada para quantificar a proporção da intensidade da auréola solar na radiação solar direta ortogonal medida por pireliômetro (DNI).

$$\text{CSR} = \frac{I_{\text{CSR}}}{I_{bT} - I_{\text{CSR}}} \quad (2.8)$$

onde I_{CSR} (*Circumsolar Ratio*) é a porção da irradiância medida pelo sensor (I_{bT}), que é emitida pela auréola solar. Na literatura, é comum designar a irradiância direta normal por DNI (*Direct Normal Incidence*). O símbolo I_{bT} pode ser usado tanto na direção normal à incidência, como DNI, ou para qualquer outra inclinação diferente do plano horizontal, definido pelo subscrito T .

Os dados de cada medição foram registrados para a intensidade relativa em função do meio ângulo de um cone com limite até 30 mrad. Esse limite foi definido por atender à abertura de diversos pireliômetros disponíveis no mercado. A intensidade relativa foi uma medida adotada para relacionar a incidência de um feixe de radiação solar emitido de qualquer região do disco ou auréola solar com a incidência do feixe mais intenso, que é emitido do centro do disco solar (NEUMANN et al., 2002).

Neumann et al. (2002) desenvolveram um método para se estimar a curva de distribuição de intensidade emissiva em função do disco e auréola solar quando necessário em uma determinada análise, com base nos resultados das medições sob uma dada irradiância solar. Os autores dividiram os dados de perfil de Sol em 6 faixas de CSR. Nenhuma das medições apresentou um perfil de Sol sem auréola. A CSR 0%, é, na verdade, a média das medições com auréolas de 0,25% a 0,64% do total da irradiância incidente. Para essa faixa, o valor de I_{bT} variou entre 355 W/m² e 1016 W/m². A Tabela 2.5 mostra valores de irradiância para as outras faixas tomadas para as médias de CSR 5%, CSR 10%, CSR 20%, CSR 30% e CSR 40%.

Tabela 2.5 – Representação de CSR para faixas de proporção de auréola medidas. (NEUMANN et al., 2002).

CSR médio (%)	Faixa de CSR medido (%)	Faixa de radiação solar direta - DNI (W/m ²)
CSR 0	0,25-0,64	355-1016
CSR 5	4,02-5,89	382-952
CSR 10	8,68-12,9	351-907
CSR 20	17,99-23,7	231-750
CSR 30	26,9-33,91	118-495
CSR 40	36,45-46,2	167-405

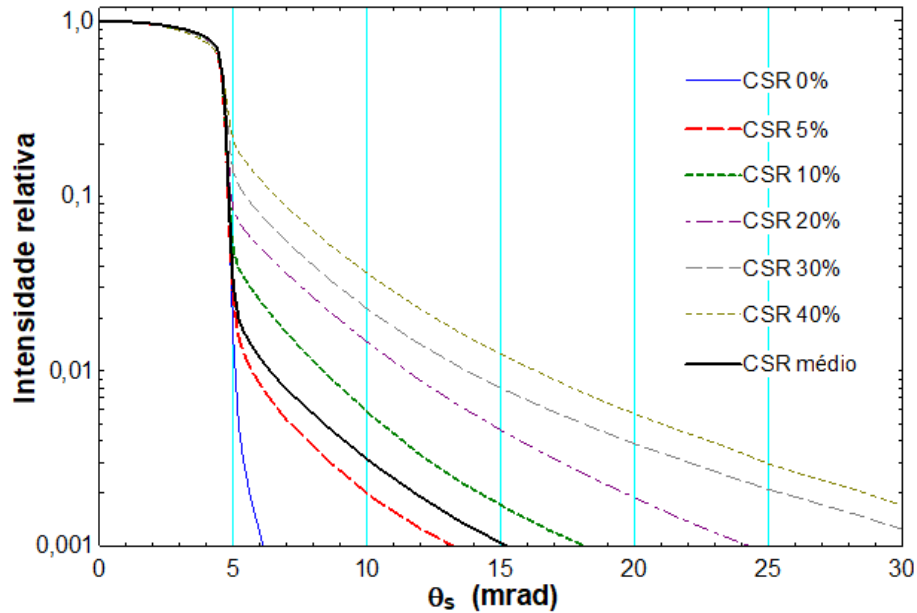


Figura 2.40 – Perfil de emissão de radiação do disco e aureola solar (NEUMANN et al., 2002).

Cada média de CSR da Tabela anterior, e também de $\overline{\text{CSR}}$, teve os perfis das curvas plotados na Figura 2.40. As curvas dos perfis de CSR explicita a influência que a auréola exerce sobre a dimensão e fluxo na imagem focal de concentradores solares. Para que isso seja mais facilmente considerado nas medições desse e de outros trabalhos, a Tabela A do anexo A, apresenta os dados para CSR de cada curva, fornecidas por Neumann et al. (2002). Os autores tabelaram 50 dados para cada CSR. A distribuição dos dados está em função de θ' , que é o ângulo entre o feixe, que deixa o Sol no centro do disco solar, e uma linha entre um ponto de incidência e outro ponto em qualquer região do disco ou auréola solar até 30 mrad.

A Tabela A.1, também do anexo A, mostra a frequência de ocorrência de irradiância para as respectivas faixas de CSR. Neumann et al. (2002) recomendam que as Tabelas A e A.1 sejam usadas em conjunto. Para determinar a curva de CSR mais provável para um dado estudo, os dados respectivos ao CSR da Tabela A devem ser ponderados com a Tabela A.1 conforme a faixa pertencente à irradiância DNI medida.

Como exemplo, se for necessário obter-se a curva mais provável da distribuição da irradiância em função de θ' do disco solar, e o pireliômetro registra 750 W/m^2 , a quinta coluna da Tabela A.1 deve ser considerada para ponderar com os valores das colunas de 2 a 6 da Tabela A. Portanto, os pontos para cada θ' da curva seriam dados por $\text{CSR} = 0,774(\text{CSR } 0) + 0,124(\text{CSR } 5) + 0,074(\text{CSR } 10) + 0,027(\text{CSR } 20) + 0,1(\text{CSR } 30) + 0,0(\text{CSR } 40)$. Para estimativas de perfil de Sol, em que não há DNI medido, Neumann et al. (2002) sugerem utilizar os dados médios para todas as incidências, $\overline{\text{CSR}}$.

2.4 MEDIÇÕES DA IMAGEM FOCAL

Esta seção detalha alguns métodos utilizados para medição de fluxo da imagem focal de concentradores solares, que podem ser classificados em dois grupos: métodos diretos e indiretos. Ambos são realizados com pelo menos uma câmera e um alvo para projeção da imagem, mas somente o método direto possui sensor na zona focal. Röger et al. (2014) destacaram as vantagens e desvantagens mais evidentes de vários métodos dentro desses dois grupos.

A maioria dos sistemas de medição de imagem focal utilizou um alvo para projeção instalado no plano focal, uma câmera fotográfica com sensor CCD ou CMOS e um sensor para medir o fluxo de energia. Nos sistemas de medição direta, normalmente, utiliza-se um ou mais sensores de Gardon instalados no alvo. Nos sistemas indiretos o alvo não possui sensor, mas são utilizados sensores de radiação solar, i. e., pireliômetro.

O alvo é feito com placa plana metálica com tratamento superficial para que tenha propriedade Lambertiana, isto é, a reflexão da radiação solar deve ser totalmente difusa. O conceito de superfície lambertiana é ideal, mas é possível realizar a aproximação pela escolha de materiais e tratamento na superfície. A placa pode ser feita de aço, alumínio, cobre ou outro material que dê base para o tratamento superficial e que dissipe o calor proveniente da energia do foco. O tratamento superficial tem o objetivo de manter alta refletividade e, para que a reflexão seja difusa, são feitos tratamentos para obter-se rugosidade.

Os sensores utilizados medem a radiação solar incidente por meio de diferencial de temperatura. O transdutor de fluxo de calor da fabricante Vatel Corporation, também chamado de sensor de Gardon, utilizado em vários artigos revisados nesta seção, é formado por um cilindro de cobre tampado em um dos lados por uma folha de Constanta. Um fio de cobre é soldado no centro da folha de Constanta. A radiação solar incidente aquece a folha de Constanta e, a diferença de potencial gerada entre os dois materiais do sensor é proporcional ao fluxo de energia. O sensor possui um sistema de refrigeração no lado interno do cilindro, que mede fluxos de até aproximadamente 5 kW/cm^2 (VATELL, 2020).

As câmeras com sensores CCD (*charged coupled device*) possuem qualidade superior e, para fins científicos, são mais utilizadas. No entanto, a qualidade das câmeras CMOS (*complementary metal-oxide semiconductor*) já atingiram paridade tecnológica. Além disso, dissipam menos energia, são menores, mais baratas, e possuem funcionalidades que facilitam as medições de fluxo como a correção de corrente escura, que é um efeito fotovoltaico decorrente da variação de energia térmica no sensor e é fonte de ruídos na imagem (BALLESTRÍN et al., 2019).

Alguns trabalhos de medição da imagem focal utilizaram outros tipos de estrutura. Hernández et al. (2012) instalaram três arames de aço em um concentrador tipo prato parabólico. Dois arames foram presos na borda do concentrador solar, cujo ângulo de borda

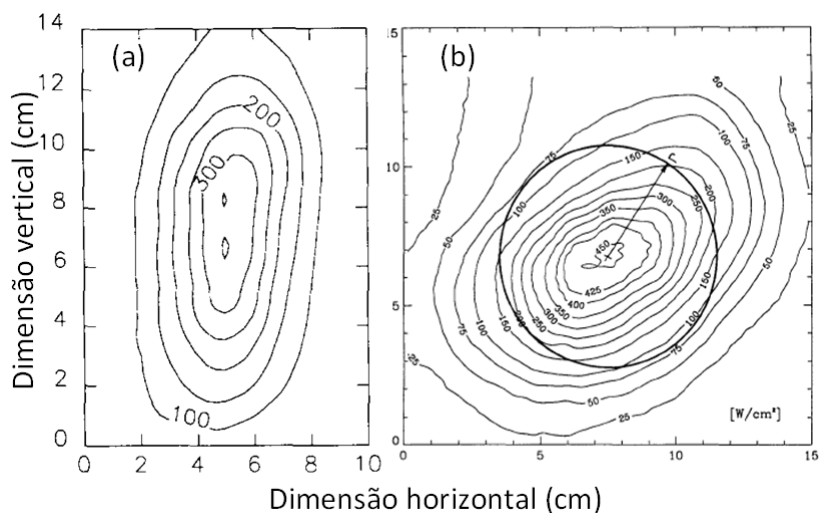


Figura 2.41 – Distribuição do fluxo de energia no foco do concentrador solar medido por (a) Ries e Schubnell (1990), em agosto, e (b) Steinfeld e Schubnell (1993), em outubro. (Adaptado)

era de 90° , portanto, o plano da zona focal coincidia com o plano da borda do concentrador. O terceiro arame foi instalado em coincidência com o eixo da parábola, perpendicular ao plano de abertura do concentrador. Os três arames estavam perpendicularmente instalados, como três eixos do sistema de coordenadas cartesiano. As medições revelaram uma imagem elipsoidal, com 8,4 cm e 8,9 cm nos eixos do plano de abertura e 10 cm no eixo perpendicular ao plano de abertura. Segundo os autores, a incerteza foi de 0,2 cm e o ângulo do cone ótico refletido pelos espelhos foi de 7 mrad.

Ries e Schubnell (1990) analisaram a imagem formada pelo concentrador da Figura 2.6. Os equipamentos utilizados foram o alvo lambertiano e uma câmera CCD, que foi calibrada com um radiômetro Kendall (medição direta). A calibração foi feita por sucessivas medições, e o fluxo no centro da imagem foi de 350 W/cm^2 quando o DNI era de 880 W/m^2 , e a potência total do coletor foi de 17 kW. A Figura 2.41a ilustra a distribuição do fluxo de energia no foco do concentrador solar.

Posteriormente, com a mesma estrutura de Ries e Schubnell (1990), Steinfeld e Schubnell (1993) realizaram outra medição da imagem do foco. O equipamento utilizado foi aparentemente o mesmo. Nessa nova medição, o pico do fluxo de energia na imagem foi de 456 W/cm^2 com DNI de 710 W/m^2 . Este ponto foi considerado como o centro da imagem focal, marcado pelo círculo na Figura 2.41b, que corresponde à região para abertura do receptor. O fluxo mínimo, na borda do círculo, foi de 50 W/cm^2 . Potência total foi de 18,9 kW. O sistema de rastreamento do concentrador solar de Ries e Schubnell (1990), instalado no helióstato, possuía dois eixos. Segundo os autores o perfil de fluxo da imagem variava com a declinação solar, que explica a diferença entre as Figuras 2.41a, medida em agosto, e 2.41b, medida em outubro.

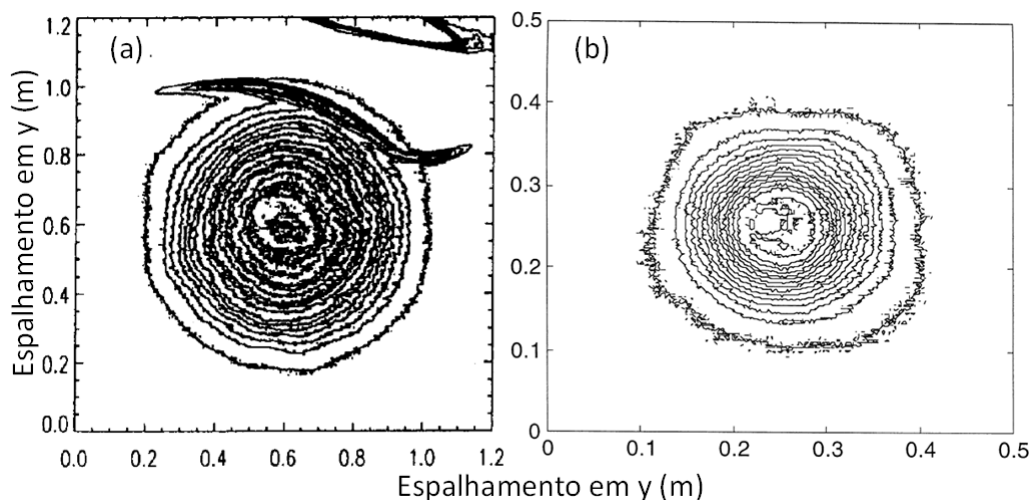


Figura 2.42 – Imagens dos focos dos concentradores parabólicos de (a) Johnston (1995a), e (b) Johnston (1998). (Adaptado)

Johnston (1995a) mediu a imagem de um concentrador solar tipo prato parabólico com área de abertura de $A_{ap} = 400 \text{ m}^2$. O alvo foi feito de alumínio com sistema de refrigeração (água). A câmera utilizada foi do modelo Sony CCD XC-999P, com resolução de 752×582 pixels. Filtros foram instalados para evitar saturação da imagem devido à luz intensa do foco do concentrador. A imagem foi gravada em fita cassete Panasonic VHS (PAL) NV-FS100HQ. A calibração da imagem foi feita com sensor de Gardon da fabricante HyCal instalado na placa alvo. O suporte para a placa tinha um ajuste elétrico para posicionamento em relação ao eixo da parábola, isto é, para ajuste na posição em relação ao foco nominal. A superfície do alvo foi coberta com uma tinta branca para altas temperaturas.

A Figura 2.42a ilustra a imagem focal de Johnston (1995a). Segundo o autor, a distorção que quase tangencia a fronteira da imagem ocorreu devido à quebra do filtro da lente da câmera, mas foi possível ajustar a distorção pela simetria da imagem focal. A integral da imagem, calibrada com o radiômetro, resultou em fluxo total de $256 \pm 25 \text{ kW}$. Os autores compararam o resultados das medições da câmera com cálculos devido à diferença de temperatura da água na entrada e na saída do alvo, cujo resultado foi de $249 \pm 26 \text{ kW}$. Por cálculo de área do refletor, o fluxo total na imagem foi de $243 \pm 18 \text{ kW}$. O fluxo no pico foi de $1,13 \text{ MW/m}^2$ para 875 W/m^2 de irradiância solar, 1290 sóis. Normalizado para irradiância de 1000 W/m^2 e refletividade 1, a concentração foi de 1790 sóis no pico e 810 sóis na média, com $\gamma = 0,90$. O raio da circunferência da imagem foi de $0,375 \text{ m}$.

Johnston (1998) utilizou a mesma câmera, sistema de vídeo cassete e radiômetro utilizado por Johnston (1995a), para medir a imagem focal de um concentrador solar parabólico de 20 m^2 . O alvo foi feito com uma placa de cobre resfriado à água. A geometria da placa era circular com diâmetro de $0,5 \text{ m}$. A superfície para a projeção do

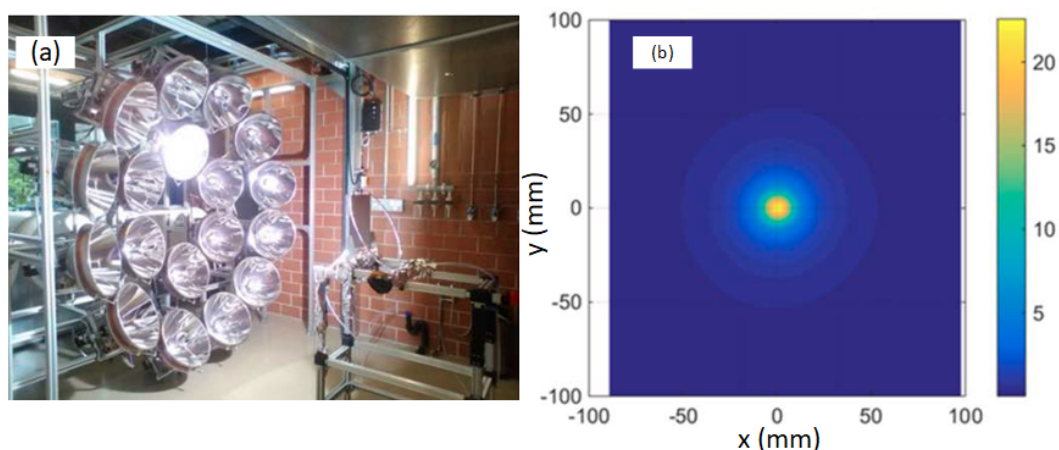


Figura 2.43 – Simulador solar (a) e imagem registrada na zona focal (b). (Adaptado de Levêque et al. (2016))

foco do concentrador foi pintada com spray branco com acabamento fosco para aproximar da propriedade lambertiana. O radiômetro para calibração foi instalado no centro do alvo. A câmera, com filtros de alta densidade, foi instalada no vértice da paraboloide e a imagem foi capturada (Figura 2.42b). O radiômetro apareceu como uma pequena região circular e escura no centro da imagem focal.

Para calibrar, Johnston (1998) considerou que a escala de cinza dos píxeis de um anel externo à essa pequena circunferência escura tiveram o fluxo igual ao medido pelo sensor. O pico do fluxo foi de 970 kW/m^2 , com incidência normalizada em 1000 W/m^2 , a razão de concentração foi de 970 sóis, com a energia refletida pelo concentrador em 20 kW . O perfil do fluxo de energia na imagem focal teve topo plano, segundo os autores, devido aos espelhos serem quadrados planos de 10 cm de lado. O método para calcular o desvio de reflexão foi intuitivo. Com aproximação numérica gaussiana bivariada concluiu-se que o melhor ajuste para ângulo de reflexão do concentrador foi de 2 mrad .

Simuladores de concentrador solar têm sido utilizados para desenvolvimento de receptores para reação de oxirredução na produção de H_2 e gás de síntese. O simulador de Levêque et al. (2016) possuía 18 refletores elipsoidais (Figura 2.43a). Cada concentrador possui uma lâmpada de xénon em um dos focos. A potência total das lâmpadas era de $45 \text{ kW}_{\text{el}}$. A elipsoide possui dois focos, portanto, segundo foco de todos refletores (chamado de foco do simulador) são coincidentes em uma região do espaço, a zona focal do simulador, onde o receptor é instalado. A medição da imagem focal foi feita com um alvo Lambertiano de alumínio com sistema de refrigeração. A superfície lambertiana foi feita pela aplicação de alumina por aspersão térmica e um sensor de Gardon da Vattel foi instalado. A câmera utilizada da fabricante Basler® de 1,5 Megapixel com sensor CCD e resolução monocromática de 12 bit. Um filtro de densidade ótica OD4,0 foi instalado na lente com zoom $f = 12,5\text{--}75 \text{ mm}$. A imagem do foco está apresentada pela Figura 2.43b.

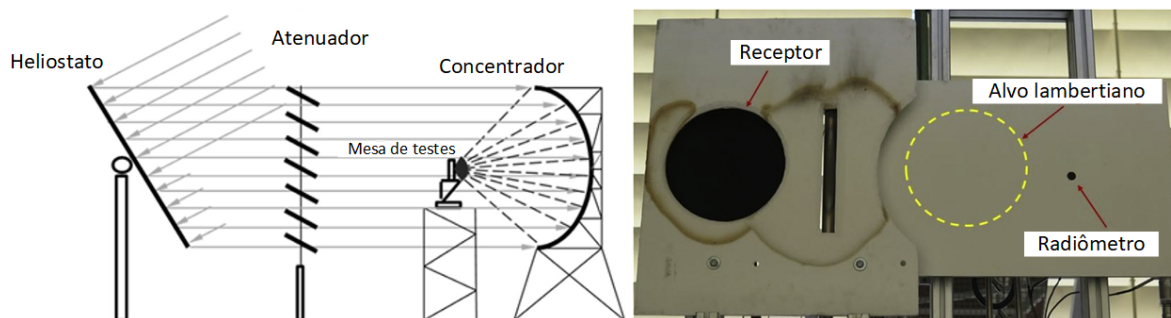


Figura 2.44 – Esquerda: esquema do layout do concentrador solar com helióstato. Direita: Estrutura do alvo lambertiano para as medições (Adaptado de Ballestrín et al. (2019))

Levêque et al. (2016) realizaram as medições da imagem focal com o intuito de verificar a distribuição da emissão modular do simulador. As medições foram feitas com uma lâmpada ligada de cada vez, e, depois, as fotografias foram sobrepostas (Figura 2.43b). As potências verificadas foram no intervalo de 1020 a 1520 W/m². O pico de fluxo foi de 21,7 MW/m², e a potência verificada no foco foi de 11,3 kW.

Ballestrín et al. (2019) mediram a imagem focal de um concentrador solar parabólico com helióstato. A estrutura do concentrador solar era fixa e o sistema de rastreamento ficava no helióstato. Entre o helióstato e o concentrador solar havia um atenuador (semelhante a brises) para controle da radiação incidente (imagem esquerda da Figura 2.44). Para a medição, a câmera utilizada foi uma Hammamatsu com sensor CMOS, resolução de 2048 x 2048, e profundidade de cor de 16 bits. Foram instalados três filtros com densidades de OD1,0, OD3,0 e OD4,0. A calibração foi por meio de um radiômetro da Vattel, que foi instalado na placa de alumínio, resfriado com água. A superfície lambertiana da placa foi feita pela aplicação de uma tinta clara que é normalmente utilizada para ambientes com alto índice de radiação nuclear, como interior de reatores para navios. A marca e modelo da tinta era Amercoat[®]741. A placa com o radiômetro está ilustrada pela fotografia à direita da Figura 2.44.

Ballestrín et al. (2019) compararam medições realizadas no alvo lambertiano e no receptor (conforme indicação na Figura direita 2.44). A o tempo de exposição de captura de imagem quando o receptor estava na região focal foi aproximadamente dez vezes maior quando o alvo lambertiano estava na posição. O ajuste das brises foi feito para obtenção de picos de incidência na imagem em três níveis: 500 kW/m², 690 kW/m² e 900 kW/m². A discrepância entre o uso do alvo lambertiano e do receptor escuro plano foi de 2% para as medições. Os autores também verificaram que quanto maior for o DNI, menor é a incerteza. O radiômetro instalado no alvo lambertiano (Figura 2.44) pode ser visto na imagem focal da Figura 2.45a pela pequena região escurecida no centro da imagem da Figura.

Bode, Gauche e Landman (2012) mediram a imagem focal de um concentrador de torre central. O alvo foi feito a partir de uma placa de aço carbono. Na superfície

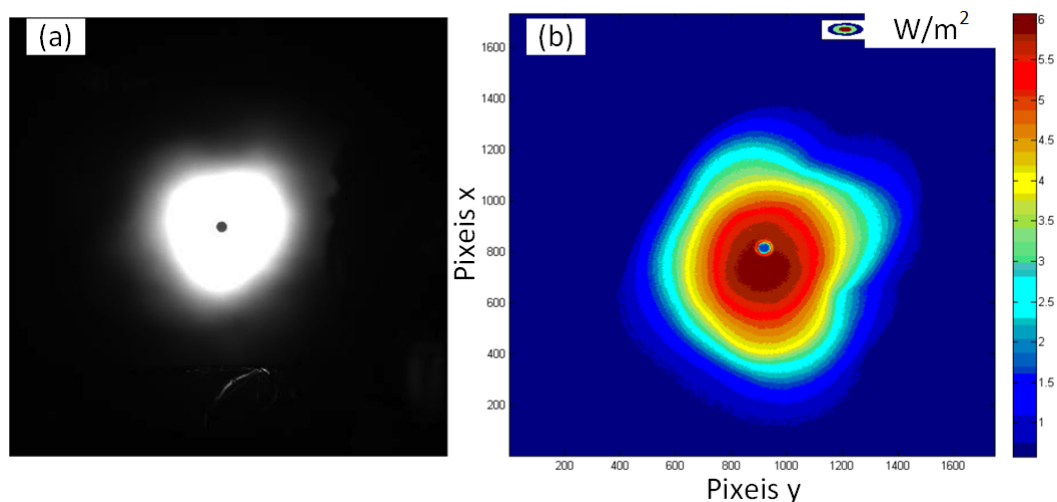


Figura 2.45 – Imagem focal dos concentradores de (a) Ballestrín et al. (2019), e (b) Bode, Gauche e Landman (2012). (Adaptado)

lambertiana, a placa foi pintada com tinta e lixada para adquirir rugosidade. Um medidor de Gardon, da fabricante Vatell, foi instalado no centro da placa para calibração da câmera. A imagem focal da Figura 2.45b mostra a captura após o tratamento da imagem com o Matlab. As cores estão de acordo com o fluxo de energia, exceto para a pequena região do sensor, visível na Figura 2.45b. O pico de fluxo de energia foi de $6,35 \text{ kW/m}^2$, medido pelo sensor de Gardon.

Uma comparação entre dois sistemas de medição da imagem focal foi realizada por Ballestrín e Monterreal (2004). Um desses sistemas era de medição direta. Os autores construíram oito termopilhas diferenciais, que mediam o fluxo de calor e a temperatura da superfície (usada para correção no valor do fluxo de calor). Esses sensores foram instalados linearmente em uma barra de 25 mm de largura. Essa barra foi instalada em uma placa articulada, utilizada como suporte para realizar a varredura para a medição do fluxo na imagem focal. Na movimentação angular, a placa passava na frente do receptor. Duas barras de referência, vistas na Figura 2.46, foram instaladas à frente do receptor de forma que fizesse sombra nos sensores durante a passagem. Essa sombra era vista na análise dos dados e utilizadas para cálculo da velocidade angular e, então, localizar a posição dos dados medidos da imagem. A região de contato entre o sensor e o fluxo de energia da imagem recebeu revestimento preto (Zynolite®). A resposta dos sensores era rápida, na ordem de 2 a 6 microssegundos. A varredura forneceu 346 dados. Outros 4164 dados foram obtidos por interpolação. Segundo os autores, aumentar o número de dados não melhoraria a qualidade da imagem significativamente, porém, aumentaria consideravelmente o tempo de processamento. A incerteza calculada desse método foi de 6%.

O outro sistema comparado também foi por medição direta, mas com sensor de Gardon de dois modelos da Vatell®, 7016 e 7017. A placa utilizada na medição direta

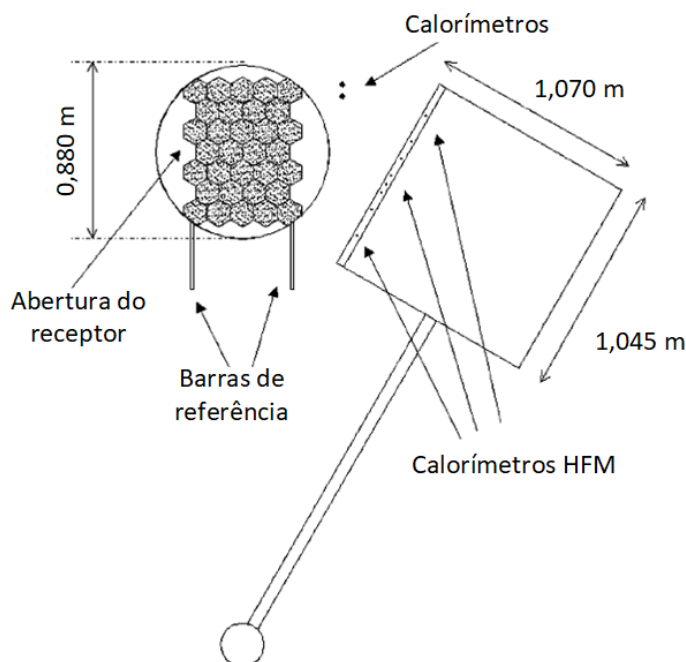


Figura 2.46 – Sistema de medição direta por varredura e pelo alvo lambertiano de Ballestrín e Monterreal (2004).

era um alvo lambertiano. Esse alvo foi feito de aço carbono sem sistema de refrigeração. Para o preparo da superfície lambertiana foi aplicado um jateamento de areia e pintura com Amercoat[®]741, descrito em Ballestrín et al. (2018). Utilizaram, também, uma câmera fotográfica monocromática com sensor CCD. A tonalidade da cor na escala da de cinza é proporcional à incidência de radiação na área do pixel analisado (mais bem detalhado na seção 5.2.3.1), conforme calibração com o sensor de Gardon. Os autores aplicaram o mesmo revestimento preto (Zynolite[®]) na área de contato com a radiação solar concentrada para intensificar a conversão de radiação solar em energia térmica. Estes sensores suportam fluxo de energia de até 1200 kW/m². Em comparação com o método anterior, o uso do sensor 7016 foi equivalente, enquanto o sensor 7017 foi 1% mais preciso. O fluxo médio foi entre 400 e 500 kW/m².

Schmitz et al. (2017) caracterizaram um concentrador solar paraboloidal com espelhos feitos de membranas encurvadas a vácuo (Figura 2.47). Os autores testaram duas espessuras de membranas prateadas, 0,3 mm e 0,2 mm. O sistema de medição foi composto por uma câmera Basler[®] com sensor CMOS de 5 Megapixels e um filtro de densidade neutra de OD3,0. O alvo foi feito de alumínio com medidas de 300 mm x 300 mm com refrigeração interna. No centro dessa placa de alumínio havia um furo quadrado de 52 mm x 56 mm onde havia uma placa de cobre com refrigeração interna (ver Figura 2.47). A superfície de projeção da imagem focal recebeu cobertura de Al₂O₃ em ambas as partes, alumínio e cobre.

Segundo Schmitz et al. (2017), a calibração foi feita pela análise das temperaturas

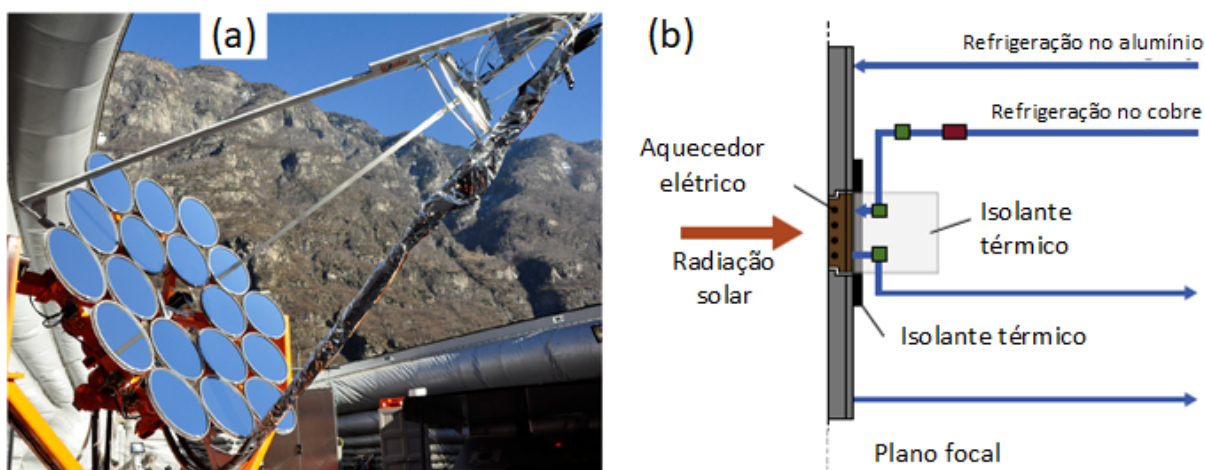


Figura 2.47 – (a) Concentrador solar com membranas evacuadas e (b) alvo lambertiano resfriado. (Adaptado de Schmitz et al. (2017))

de entrada e saída dos dois circuitos de refrigeração, e foi comparada pelos dados de DNI registrados. Mas, no método de calibração pelas medições de temperatura, foi considerado as perdas por convecção da placa de cobre. Essa medição foi feita previamente por aquecimento elétrico da placa de cobre. Nas medições dos autores, os fluxos médios na imagem com as membranas de 0,3 mm e 0,2 mm foram de 762 sóis e 897 sóis, respectivamente. Os picos de fluxo foram de 2912 sóis e 3140 sóis, respectivamente.

Os concentradores solares Distall II e Eurodish (Figura 2.48), da Plataforma Solar de Almería (PSA), na Espanha, são do tipo prato parabólico com $f = 4,98$ m e $d_{ap} = 8,5$ m e $f = 4,5$ m e $d_{ap} = 8,5$, respectivamente (ALMERÍA, 2019). Em ambos foram instalados motor stirling com receptores de 10 kWe.

Ulmer et al. (2002) construíram um sistema de medição e comparou a formação de imagem dos concentradores da PSA. A placa utilizada para alvo lambertiano foi feita

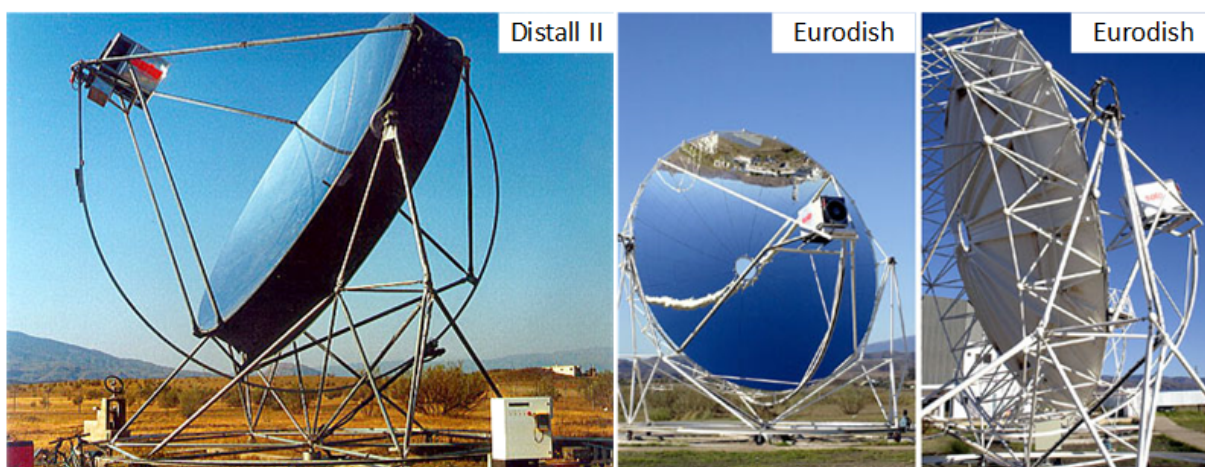


Figura 2.48 – Concentradores tipo prato parabólico da Plataforma Solar de Almería. DISTAL II (à esquerda) e EURODISH (à direita) (ALMERÍA, 2019).

de cobre com sistema de refrigeração. Para a superfície lambertiana alumina foi aplicada por aspersão térmica. A câmera utilizada foi da THETA-SIS com resolução de 286x384 píxeis com sensor CCD. A calibração foi feita com um pireliômetro e com dados óticos dos concentradores, a refletividade do espelho, ρ_m , e a área de abertura real, A_a . Segundo os autores, a somatória dos valores da escala de cinza dos píxeis da fotografia imagem focal é igual à energia disponível no foco.

O objetivo do trabalho de Ulmer et al. (2002) consistia em encontrar o melhor posicionamento para o receptor, de modo que o fator de interceptação ótico seja maximizado, mas a distribuição do fluxo de radiação na parede do receptor seja menos heterogêneo possível. Pois, segundo os autores, pontos com maior fluxo de radiação solar pode submeter o material à tensões e danificar o absorvedor. A medição foi realizada em diferentes planos paralelos ao plano do foco nominal. As Figuras 2.49a e 2.49b são imagens focais do concentrador Distal II e as Figuras 2.49c e 2.49d, relativas ao Eurodish.

A Figuras 2.49a e 2.49c são imagens capturadas com o alvo lambertiano no plano do foco dos concentradores. Na primeira, o pico de fluxo foi de 11.960 kW/m^2 , e no ajuste de $\gamma = 90\%$ o raio foi de 96 mm. Na imagem focal do Eurodish, o pico foi de 12.730 kW/m^2 e com ajuste de $\gamma = 90\%$ o raio foi de 72 mm. Ambas as curvas apresentaram distribuição próximas à gaussiana. A abertura do receptor de Distal II estava localizada em um plano a 160 mm atrás do plano focal, com o pico de fluxo em 1.520 kW/m^2 e $\gamma = 72,5\%$. A imagem focal da Figura 2.49b foi capturada em um plano 36 mm mais próximo que a posição anterior. A linha tracejada hexagonal é referente a abertura do receptor. O pico

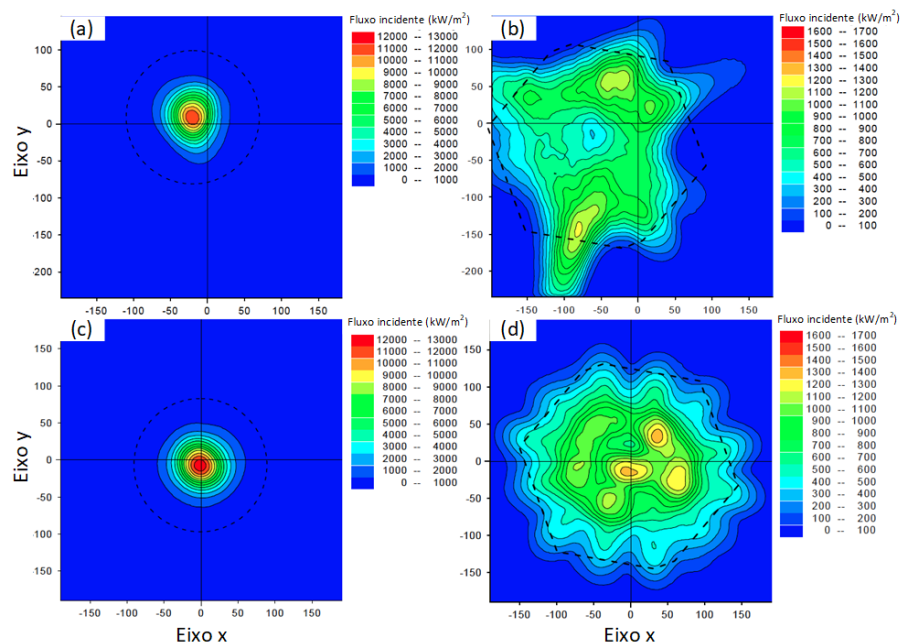


Figura 2.49 – Imagens focais do concentrador Distal II (a) no plano focal e (b) em plano paralelo, e do concentrador Eurodish (c) no plano focal e (d) em plano paralelo ao da zona focal. Adaptado de Ulmer et al. (2002).

de fluxo diminuiu para 1.230 kW/m^2 e o fator de interceptação aumentou para $74,4\%$. A imagem focal da Figura 2.49d foi adquirida em plano 15 mm mais distante e com borda do concentrador tensionada. Antes do tensionamento, o pico foi de 1.640 kW/m^2 com $\gamma = 80,5\%$ na área hexagonal. Com a borda do refletor tensionada, o pico diminuiu para 1.360 kW/m^2 com $\gamma = 80,9\%$.

Na medição de um concentrador solar tipo prato parabólico com abertura de 500 m^2 , Lovegrove, Burgess e Pye (2011) utilizaram o método indireto conforme Ulmer et al. (2002). Nesse estudo, a câmera utilizada foi uma Prosilica GC1290 12-bit monocromática (CCD). Os autores tentaram utilizar alvo de alumínio com refrigeração a água e com revestimento de Al_2O_3 , mas foi danificada pela alta temperatura atingida no foco. Então, o esforço realizado para medição do foco foi em noite de Lua cheia. Segundo o autor, a concordância entre os ângulos sólidos da Lua e do Sol, a partir da Terra, é aproximadamente 7% .

A Figura 2.50b representa uma fotografia da imagem focal do concentrador de Lovegrove, Burgess e Pye (2011). A placa do alvo lambertiano pôde ser deslocada ao longo do eixo do concentrador para localização da região com maior razão de concentração. A distância focal nominal do concentrador foi de $f = 13,4 \text{ m}$, e, nas medições, distâncias no intervalo entre $13,4$ e $13,45 \text{ m}$ apresentaram a máxima razão de concentração geométrica e ótica. Com desvio de reflexão de $1,3 \text{ mrad}$, via *Ray Tracing*, foi possível converter os dados obtidos com a Lua, para o Sol. A razão de concentração geométrica e o diâmetro para abertura de receptor com $\gamma = 0,90$ foi de 3900 e 400 mm , e com $\gamma = 0,95$ foi de 2240 e 530 mm , respectivamente. A Figura 2.50a mostra a distribuição do fluxo de energia na imagem focal em dois eixos.

Dähler et al. (2018) compararam os fluxos máximo e médio de diferentes configurações geométricas de refletor para um concentrador solar prato parabólico cujo receptor era um reator para processo de oxirredução para obtenção de H_2 . Assim, em três, das seis configurações, haviam somente o refletor primário, isto é, o paraboloidal, onde a radiação

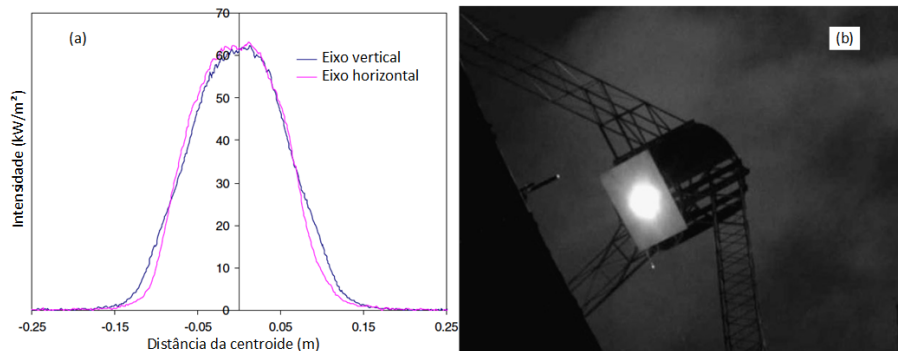


Figura 2.50 – (a) Perfil de fluxo de energia em dois eixos e (b) fotografia da imagem focal do concentrador de Lovegrove, Burgess e Pye (2011).

solar incidente era refletida diretamente para o receptor localizado na região focal. As variações eram relativas ao alinhamento do receptor em relação ao eixo parabólico. Nas outras três configurações haviam um espelho secundário, onde a radiação solar incidente era refletida pelo primário, depois pelo secundário, e então, atingia o receptor, como mostra o exemplo de um dos concentradores na Figura 2.51a. As variações desses concentradores estavam no ângulo de borda do refletor primário e na geometria, plana ou hiperboloidal, e posição do refletor secundário. O refletor primário, o prato parabólico, tinha área de abertura de $14,7 \text{ m}^2$. Segundo os autores, o propósito do segundo refletor é facilitar a manipulação nos receptores da Figura 2.51b, devido a localização na estrutura.

O suporte mostrado pela Figura 2.51b comportava dois reatores, o calorímetro e o alvo lambertiano. O alvo lambertiano era refrigerado com água e a superfície era com Al_2O_3 . A câmera era com sensor CCD, da Basler, modelo scA1400-17gm, lentes com zoom manual e filtro com densidade neutra ND 4,8. Apesar do calorímetro, os autores calibraram o sistema com medições de um pireliômetro. A consideração para calibração foi a mesma de Ulmer et al. (2002).

Nas medições em dois concentradores para considerações dentro de uma área circular de raio de 30 mm na imagem focal, foram registrados valores para o fluxo máximo de 10.160 sóis e o médio, 3.630 sóis para o concentrador com um refletor. No concentrador com dois refletores, o fluxo máximo foi de 5.010 sóis e o médio, 2.660 sóis com o mesmo raio de abertura no foco. Os fatores de interceptação e a energia disponível no foco, dentro do raio de 30 mm foram de $\gamma = 78,8\%$ e 10,3 kW e $\gamma = 70,3\%$ e 7,5 kW, respectivamente. De acordo com Dähler et al. (2018), a diminuição da energia disponível no segundo concentrador solar é devido às perdas óticas no segundo refletor. Os concentradores somente com refletores primários apresentaram os fluxos de energia mais altos. Mas, os autores julgaram o concentrador com refletor secundário plano como o mais vantajoso.

As estruturas utilizadas nos artigos revisados nesta seção, como o tipo de concentrador solar, o material da placa, se possui, ou não, sistema de refrigeração e o tipo de tratamento para superfície do alvo lambertiano, bem como o equipamento utilizado para

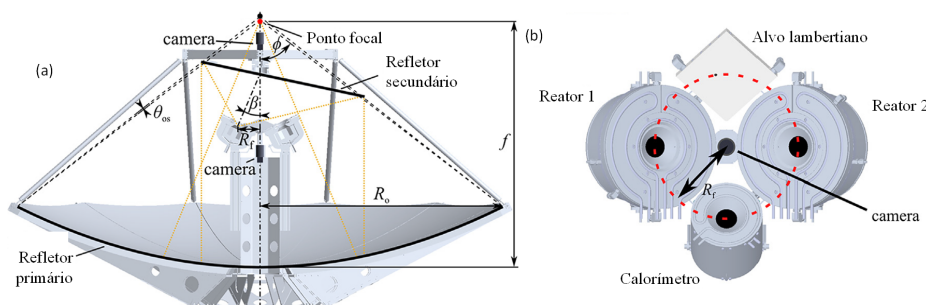


Figura 2.51 – (a) Concentrador solar do tipo prato parabólico e (b) equipamentos da zona focal (alvo lambertiano, câmera, reatores e calorímetro. Dähler et al. (2018).

calibração, se foi com radiômetro ou pireliômetro, e o erro das medições, estão relacionadas na Tabela 2.6. A Tabela 2.7 relaciona os equipamentos de registro de imagem, bem como as resoluções de píxeis e de escala de cinza, lentes e filtros. Nota-se que os trabalhos mais recentes já usam sensores CMOS, de acordo com a justificativa de Ballestrín et al. (2019).

Os métodos revisados nessa seção foram: medição dimensional com arames ortogonais, medição direta com barra móvel (Figura 2.46), medição indireta com absorvedor exposto, medição direta com alvo lambertiano estacionário e medição indireta com alvo lambertiano estacionário. As calibrações das duas últimas são feitas em simulação, onde o dado de fluxo de energia incidente é calibrado para a escala de cinza dos píxeis da fotografia. Esses métodos, exceto o primeiro, foram comparados conceitualmente por Röger et al. (2014) e discutidos a seguir.

2.4.1 MEDIÇÃO DIRETA COM BARRA MÓVEL

A medição direta com barra móvel é um método que consiste na instalação de sensores em uma barra que realiza uma varredura na região focal. Os sensores registram dados de fluxo de calor, e a barra, do posicionamento. A Figura 2.46 foi um exemplo aplicado em um concentrador de torre central.

As vantagens desse método é a baixa incerteza apresentada pelas medições (BALLESTRÍN; MONTERREAL, 2004). A confiabilidade no uso de sensores de fluxo é muito boa, bem como no controle do posicionamento da barra, mas as incertezas das medições aumentam pelo fato de que a placa funciona em plano diferente do receptor. A confiabilidade operacional também é boa, mas, durante as medições, podem ocorrer algumas interrupções. Há dependência de condições climáticas, pois, o vento, a umidade, e outros fatores climáticos influenciam na perda de calor por convecção dos sensores, que aumentam as incertezas. Os custos de instalação e manutenção das barras móveis e dos sensores, bem como a complexidade devido ao sistema de refrigeração dos sensores e à articulação da barra móvel podem ser significativos. A recomendação do uso desse método é, principalmente, para sistemas em que os receptores não podem ser desinstalados, e.g., concentradores de torre central (BALLESTRÍN; MONTERREAL, 2004; RÖGER et al., 2014).

2.4.2 MEDIÇÃO INDIRETA COM ABSORVEDOR EXPOSTO

Se o concentrador solar tiver um receptor com absorvedor exposto, cuja superfície é coincidente com o plano da imagem focal, a escolha desse método pode ser viável. Estudos na Plataforma Solar de Almería têm investigado esse método (Figura 2.44). Embora a comparação de Ballestrín et al. (2019) tenha resultado em uma diferença de 2% entre as medições com o receptor e com o alvo lambertiano, Röger et al. (2014) atribuem a incerteza maior na medição com o receptor, pois as propriedades óticas na superfície de

projeção da imagem não são lambertianas e a refletividade não é homogênea. Mas o uso do pireliômetro, para calibrar os píxeis da fotografia da imagem focal, tende a aumentar a confiabilidade, embora aumente o custo. A confiabilidade no posicionamento dos dados, o controle de posicionamento, para esse método é alta.

2.4.3 MEDIÇÃO COM ALVO LAMBERTIANO ESTACIONÁRIO

As medições com o alvo lambertiano fixo na região focal podem ser diretas, com um ou mais sensores de fluxo instalados, ou indiretas, com uso um sensor externo ao sistema para medir a radiação solar direta normal (DNI), e.g., pireliômetro.

A incerteza dessa metodologia de medição, vista nos trabalhos relacionados na Tabela 2.6 é baixa. Esse sistema apresenta ótimo controle no posicionamento dos dados. Tanto no sistema direto como no indireto, a calibração da escala de cinza da fotografia da imagem focal é feita via simulação. Nos sistemas diretos, que utilizam sensores instalados na placa, pode haver alguma interrupção para ajustes durante a medição, além da dependência de condições climáticas que podem interferir perda de calor por convecção dos sensores de Gardon. Os custos e complexidade extras são devidos ao sistema de refrigeração dos sensores. Mesmo assim, a medição direta apresenta boa confiabilidade nos resultados. Nos sistemas indiretos, não há risco de interrupções nas medições. A confiabilidade da medição indireta é maior. A complexidade na instalação é baixa, pois não há sensores instalados na placa lambertiana. Os custos são maiores quando se usa o pireliômetro, em comparação com os sensores de Gardon. Entretanto, o uso do pireliômetro é tão ou mais confiável que o uso de sensores de fluxo. Para ambos, a qualidade dos resultados é fortemente dependente da calibração do sistema (RÖGER et al., 2014).

Tabela 2.6 – Tipo de concentrador solar e de alvo lambertiano utilizados para medições de imagem

Autor	Concentrador	Placa	Superfície Lam- bertiana	Resfr.	Referência	Erro total
Hernández et al. (2012)	Paraboloidal	Arames ortogonais				2,4%
Ries e Schubnell (1990)	Paraboloidal com helióstato		Branca		Kendall	
Steinfeld e Schubnell (1993)	Paraboloidal com helióstato		Branca		Radiômetro Kendall	
Johnston (1995a)	Paraboloidal	Alumínio	Tinta branca fosca	Sim	HiCal C-1312-A-300-072	
Johnston (1998)	Paraboloidal	Cobre	Tinta branca fosca	Sim	HiCal C-1312-A-300-072	
Ulmer et al. (2002)	Paraboloidal	Cobre	Al_2O_3	Sim	Pireliômetro Eppley	+3,8% -2,4%
Lovegrove, Burgess e Pye (2011)	Paraboloidal	Alumínio		Sim		
Bode, Gauche e Landman (2012)	Torre central	Aço carbono	Pintado e lixado	Não	Vattel TG1000-1	
Ballestrín e Monterreal (2004) e Ballestrín et al. (2018)	Torre central	Aço carbono jateado	Amercoat [®] 741	Não	Vattel TG1000-1	< 5%
Ballestrín et al. (2019)	Paraboloidal	Alumínio	Amercoat [®] 741	Sim	Vattel	±2,5%
Levêque et al. (2016)	Simulador elipsoidal	Alumínio	Al_2O_3	Sim	Vattel TG1000-0	±4,0%
Schmitz et al. (2017)	Paraboloidal	Alumínio	Al_2O_3	Sim	Cobre com Al_2O_3	±3,0%
Dähler et al. (2018)	Paraboloidal	Alumínio	Al_2O_3	Sim	Pireliômetro	

Tabela 2.7 – Câmeras utilizadas nas medições de imagem de concentradores solares

Autor	Câmera	Sensor	Resolução	Escala de cor	Lente (mm)	Filtros
Ries e Schubnell (1990)		CCD				
Steinfeld e Schubnell (1993)		CCD				
Johnston (1995a)	Sony [®] XC-999P	CCD	752 x 582			
Johnston (1998)	Sony [®] XC-999P	CCD	752 x 582			
Ulmer et al. (2002)	THETA-SIS	CCD	286 x 384	12 bit		
Lovegrove, Burgess e Pye (2011)	Prosilica [®] GC1290	CCD	1280 x 960	12 bit		
Bode, Gauche e Landman (2012)	Nikon [®] D5100	CMOS	4928 x 3264	14 bit		
Ballestrín e Monterreal (2004)	Hamamatsu [®] ORCA II	CCD	1024 x 1280	14 bit	10,5 - 147	
Ballestrín et al. (2019)	Hamamatsu [®] ORCA FLASH 4.0	CMOS	2048 x 2048	16 bit	80 - 200	ND 1.0, 3.0 e 4.0
Levêque et al. (2016)	Basler [®] scA 1400-17gm	CCD	1392 x 1040	12 bit	12,5 - 75	ND 4.0
Schmitz et al. (2017)	Blaster [®] acA 2500-14gm	CMOS	2592 x 1944	8 bit		ND 3.0
Dähler et al. (2018)	Basler [®] scA 1400-17gm	CCD	1392 px x 1040	12 bit	12,5 - 75	ND 4,8

3 A GEOMETRIA DO CONCENTRADOR SOLAR SCHEFFLER

No Capítulo 2 foi feita uma breve descrição da geometria do concentrador solar Scheffler foram apresentadas aplicações do concentrador Scheffler para cozinhas solares, mostrando que a geometria do concentrador permite que os fogões solares sejam utilizados dentro de uma cozinha convencional.

Geometricamente, isso é possível pelo fato da superfície do concentrador Scheffler ser uma seção lateral e inclinada de um parabolóide. A geometria da borda do refletor é o traço coincidente entre um plano inclinado a $\alpha = 43,23^\circ$ e a parabolóide da 3.1. Isso produz um formato elíptico de área plana A_s . O centro de massa dessa superfície é próximo ao ponto da parábola onde a tangente é 45° . Assim, o vértice e a imagem do foco ficam afastados e defronte ao refletor. A projeção do refletor no plano da diretriz forma um círculo. A área desse círculo é a área de abertura do concentrador solar para o Sol, A_{ap} . O eixo y do sistema de coordenadas da Figura 3.1 aponta para o centro do disco solar.

A posição representativa dos dois refletores representados na Figura 3.1 é válida somente no equinócio, quando a declinação solar é 0. Em outras declinações, o sistema de rastreamento sazonal faz os refletores se inclinarem em torno de um eixo perpendicular ao desenho a fim de manter o eixo y direcionado para o centro do Sol. Nessa movimentação, a

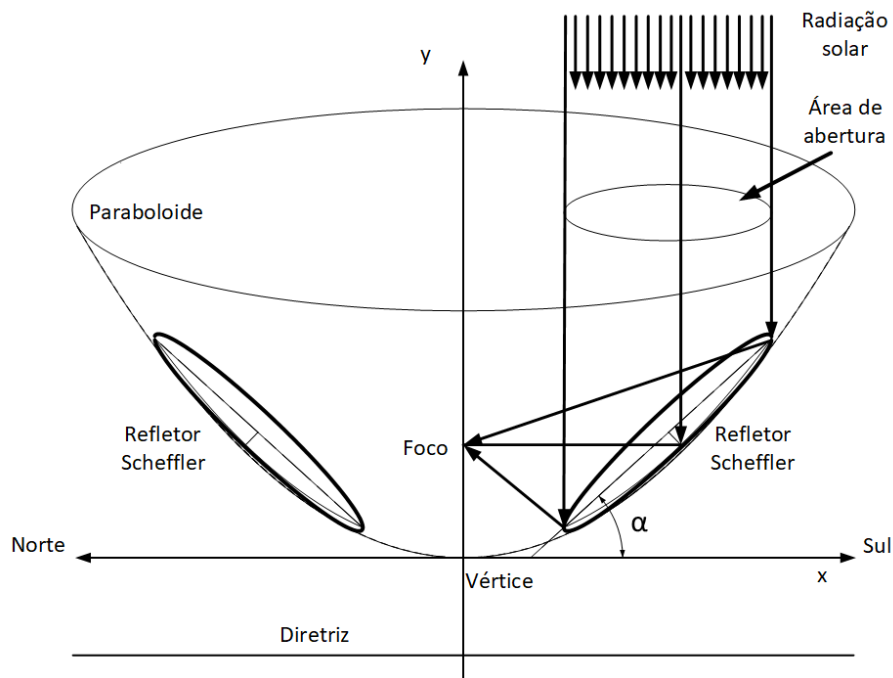


Figura 3.1 – Parabolóide com a superfície do refletor Scheffler em destaque.

aparência é de que um concentrador está cada vez mais "em pé" e outro, "deitado". Logo, para reverenciá-los pelas posições, Scheffler (2006b), Bhirud e Tandale (2006) utilizaram quatro termos (em inglês): *Standing Reflector in the Northern Hemisphere*, *Lying Reflector in the Northern Hemisphere*, *Standing Reflector in the Southern Hemisphere*, *Lying Reflector in the Southern Hemisphere*. Para simplificar a descrição, neste trabalho foi definido que a referência para os termos é o foco, havendo portanto um concentrador no lado sul (Concentrador Scheffler Sul. CSS), e outro no lado norte (Concentrador Scheffler Norte, CSN).

A estabilidade da imagem do foco ocorre devido ao sistema de rastreamento em dois eixos. Um dos eixos é paralelo ao eixo polar da Terra e rastreia o Sol quanto ao azimute, e foi denominado por Scheffler (2006b) eixo de rastreamento diário. Nos equinócios ($\delta = 0$), esse eixo coincide com a linha entre o foco e o ponto da parábola do plano que tangencia em 45° , isto é, a linha horizontal que aponta para o foco na Figura 3.1.

O segundo eixo do sistema de rastreamento é paralelo ao eixo z do sistema de coordenadas xyz e perpendicular ao plano da imagem ilustrada na Figura 3.2. Esse segundo sistema de rastreamento ajusta o concentrador Scheffler quanto à declinação solar, δ , sendo denominado sistema de rastreamento sazonal. Nesta imagem, aparecem dois concentradores Scheffler sobrepostos. Cada um dos concentradores sobrepostos indica a posição do mesmo em cada um dos solstícios, conforme sinalizado pela variação da incidência de radiação solar em $\pm 23,5^\circ$. Essa variação da inclinação do refletor, devido ao sistema de rastreamento sazonal, causa uma variação na área de abertura do concentrador solar Scheffler. Esse efeito está mais bem detalhado na seção 3.2.

A Figura 3.2 mostra um concentrador Scheffler Norte, pois a linha horizontal tracejada e pontilhada está com a indicação para o Norte. Essa linha é o eixo do sistema de rastreamento diário. Na instalação do concentrador Scheffler, a inclinação entre esse eixo e o plano horizontal deve ser no mesmo valor da latitude para que esteja paralelo ao eixo polar da Terra. Na Figura em questão, essa linha é paralela ao plano horizontal, logo, a latitude do local é 0° .

A posição da imagem focal em relação ao refletor abre novas possibilidades para aplicações em comparação com concentradores solares tipo prato parabólico, pois, conforme demonstrado por Oelher e Scheffler (1994), Scheffler (2006b), Munir, Hensel e Scheffler (2010) e vários outros, é possível utilizar a energia solar concentrada na sombra e sem necessidade de contato físico com a estrutura do concentrador. Essa característica possibilita projetar receptores mais bem isolados termicamente.

Outra possibilidade para utilização do concentrador solar Scheffler foi demonstrado nos trabalhos de Bhirud e Tandale (2006), Lukhi (2009), Gadhia e Gadhia (2006) e Gadhia (2009), por exemplo, em que foram instalados dois refletores por receptor, e vários receptores em tubo de um sistema de evaporação. Concentradores parabólicos cilíndricos e

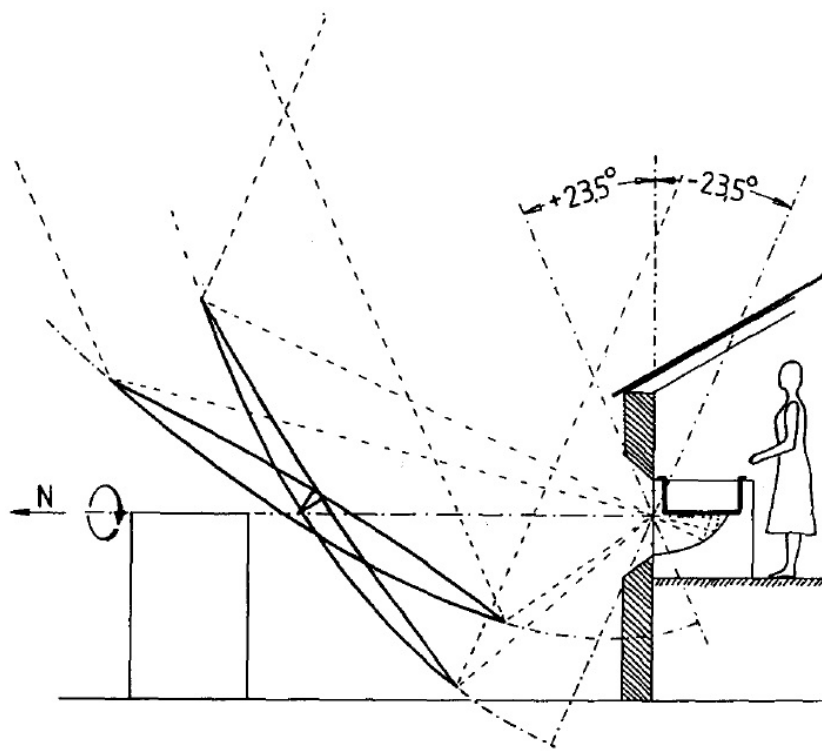


Figura 3.2 – Esquema da cozinha solar do trabalho de Oelher e Scheffler (1994) com o concentradores sobrepostos.

concentradores tipo fresnel também são utilizados para sistemas de evaporação com tubo como receptores. A literatura carece de comparações técnicas entre esses sistemas, mas, pode ser esperado que, *a priori*, devido à razão de concentração de refletores Scheffler ser maior que os dois últimos, seja, também, termicamente mais eficiente.

3.1 DIMENSIONAMENTO DO CONCENTRADOR SOLAR SCHEFFLER

A modelagem para o dimensionamento do concentrador solar Scheffler construído neste trabalho foi baseada na publicação de Munir, Hensel e Scheffler (2010). Nessa publicação, os autores apresentaram essa modelagem para o dimensionamento de um refletor Scheffler com área plana da elipse do refletor de $A_s = 8 \text{ m}^2$. Essas equações definem os parâmetros da equação da parábola para o equinócio ($\delta = 0$). A modelagem de Munir, Hensel e Scheffler (2010) também define a área de abertura no equinócio, bem como as partes estruturais do refletor e as variações ideais devido a sazonalidade.

Nesse trabalho, a modelagem para dimensionamento do concentrador Scheffler foi na mesma abordagem de Munir, Hensel e Scheffler (2010), mas escritas de forma generalizada, em função da área de abertura do concentrador para o dia n , $A_{ap,n}$. A Figura 3.3 mostra a curva do perfil parabólico pela linha tracejada e duas regiões com

linhas sólidas em negrito, que representam os perfis dos concentradores Scheffler Norte (1º quadrante) e Scheffler Sul (4º quadrante), conforme indicação de direção no eixo x . No equinócio, o vértice da parábola coincide com a origem do sistema cartesiano da Figura 3.3.

A Figura 3.3 também mostra os ângulos de vértice, que são os ângulos do eixo da parábola com a linha entre o foco ,F, e os pontos extremos do concentrador, A e B, e o eixo do sistema de rastreamento do concentrador, χ_a , χ_b e χ_{axis} , respectivamente. A corda entre os pontos A e B na Figura 3.3 é o perfil do corte da parabolóide que define a borda do concentrador Scheffler e o eixo maior da elipse do refletor. A inclinação da corda é $\alpha = 43,23^\circ$ no equinócio, como citado na seção anterior. O ponto P, onde a tangente é 45° , coincide com o eixo do sistema de rastreamento sazonal, que está perpendicular ao plano da Figura 3.3. Esse eixo pode ser visto na Figura 3.4, que ilustra a vista superior, a área de abertura do concentrador Scheffler no plano xz . O ponto M coincide com o centro da área de abertura do concentrador Scheffler.

A área de abertura para o dia n , $A_{ap,n}$, deve ser a referência do dimensionamento, que pode ser realizado de forma iterativa com as informações de demanda de energia térmica em função da sazonalidade. O raio de abertura do concentrador Scheffler no equinócio, que possui a mesma medida do semieixo menor da elipse do concentrador Scheffler, é determinado pela seguinte equação:

$$a_{s,n} = \sqrt{\frac{A_{ap,n}}{\pi}} \quad (3.1)$$

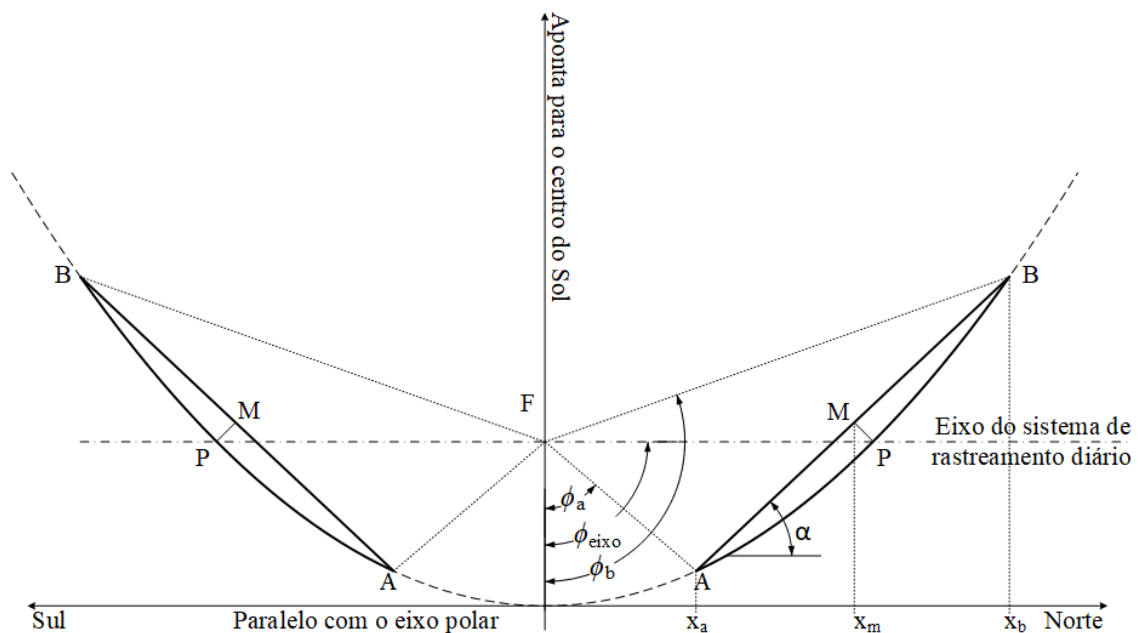


Figura 3.3 – Parábola representativa com dois concentradores Scheffler no mesmo foco. Dib e Fiorelli (2015a).

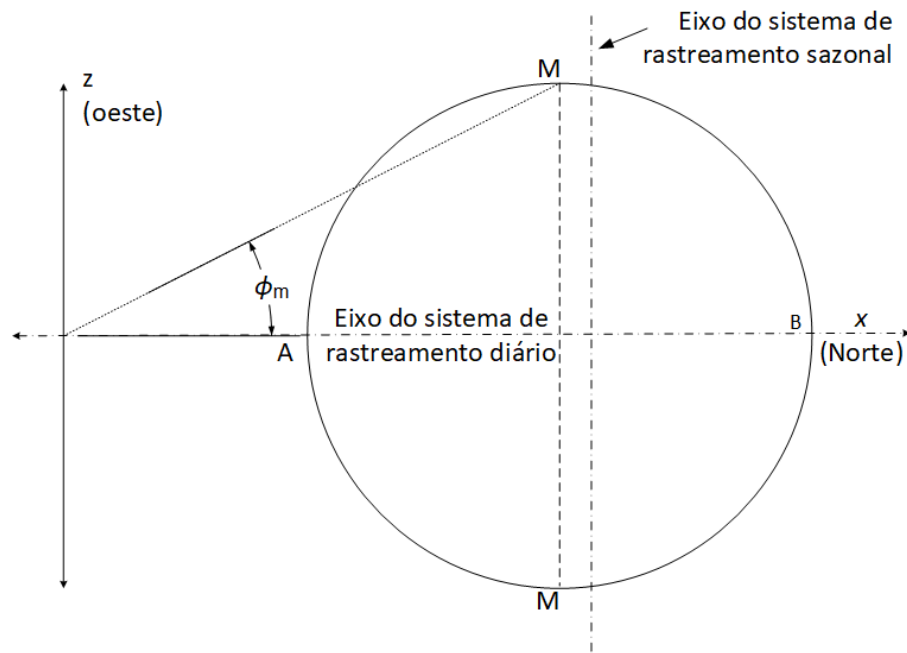


Figura 3.4 – Vista superior (no plano xz), do concentrador Scheffler. Dib e Fiorelli (2015a)

onde $a_{s,n}$ é o raio da circunferência de abertura e o semieixo menor da elipse do concentrador Scheffler, ambos para o dia n . O semieixo maior no dia n , $b_{s,n}$, é a linha que liga os pontos A e M, ou B e M, da Figura 3.3, e pode ser calculado pela seguinte equação:

$$b_{s,n} = \frac{a_{s,n}}{\cos(\alpha_n)} \quad (3.2)$$

com

$$\alpha_n = 43,23^\circ \pm \frac{\delta}{2} \quad (3.3)$$

o sinal positivo deve ser usado para concentradores Scheffler Norte, e o sinal negativo, para Scheffler Sul. Para equacionamento no equinócio, o valor da declinação solar deve ser ajustado para $\delta = 0$. A área da elipse, A_s , do concentrador no dia n , pode ser calculada por:

$$A_{s,n} = \pi \times a_{s,n} \times b_{s,n} \quad (3.4)$$

logo, a área de abertura, A_{ap} , também pode ser escrita como:

$$A_{ap,n} = A_{s,n} \times \cos \alpha_n \quad (3.5)$$

Com o valor do semieixo maior definido, tem-se o valor da distância entre os pontos A e B, pois, $\overline{AB} = 2 \times b_{s,n}$. A equação da reta \overline{AB} pode ser escrita por:

$$y = m_{ab,n}x + C_{ab,n} \quad (3.6)$$

para

$$m_{ab,n} = \tan \alpha_n$$

A reta da equação 3.6 é perpendicular à reta que conecta os pontos M e P, e é definida por:

$$y = m_{mp,n}x + C_{mp,n} \quad (3.7)$$

para

$$m_{mp,n} = \tan(\alpha_n - 90^\circ)$$

A equação da parábola segue o formato

$$y = m_{p,n}x^2 + C_{p,n} \quad (3.8)$$

com o valor de $C_{p,n} = 0$ somente no equinócio. O valor de $m_{p,n}$ da equação 3.8, pode ser calculado igualando-se a derivada dy/dx à tangente de algum ponto na curva.

$$\frac{dy}{dx} = 2m_{p,n}x \quad (3.9)$$

Para o ponto P, onde $dy/dx = \tan 45^\circ = 1$, tem-se que

$$m_{p,n} = \frac{1}{2x_{p,n}} \quad (3.10)$$

substituindo a equação 3.10 em 3.8, tem-se que

$$y_{p,n} = \frac{x_{p,n}}{2} \quad (3.11)$$

Se f é a distância entre o foco e o vértice, então $y_{p,n} = f$, e a equação 3.11 se torna

$$x_{p,n} = 2f \quad (3.12)$$

Igualando-se as equações 3.6 e 3.8 obtém-se a seguinte expressão:

$$m_p \cdot x^2 - m_{ab} \cdot x + (C_p - C_{ab}) = 0 \quad (3.13)$$

A partir da fórmula de Bhaskara, as equações para as coordenadas dos pontos A e B no eixo x podem ser definidas.

$$x_a = \frac{m_{ab}}{2 \cdot m_p} - \left[\left(\frac{m_{ab}}{2 \cdot m_p} \right)^2 - \frac{C_p - C_{ab}}{m_p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.14)$$

e

$$x_b = \frac{m_{ab}}{2 \cdot m_p} + \left[\left(\frac{m_{ab}}{2 \cdot m_p} \right)^2 - \frac{C_p - C_{ab}}{m_p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.15)$$

Se o raio de abertura $a_{s,n}$ é a metade da distância entre x_a e x_b , então,

$$a_{s,n} = \frac{x_b - x_a}{2} \quad (3.16)$$

logo, o raio de abertura é dado por:

$$a_{s,n} = \left[\left(\frac{m_{ab}}{2m_p} \right)^2 - \frac{C_p - C_{ab}}{m_p} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.17)$$

A inclinação de $\alpha = 43,23^\circ$, que pode variar entre 42° e $44,9^\circ$, é resultado de otimização para diminuição do torque no sistema de rastreamento diário (REDDY et al., 2018). O comprimento de arco da parábola entre os pontos A e P, L_{ap} devem ser igual ao comprimento entre os pontos P e B, L_{pb} , e podem ser encontrados pela igualdade $L_{ap} = L_{pb}$, com as definições abaixo:

$$L_{ap} = \int_A^P \left[\left(\frac{x}{2f} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} dx \quad (3.18)$$

e

$$L_{pb} = \int_P^B \left[\left(\frac{x}{2f} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} dx \quad (3.19)$$

As equações destacadas anteriormente podem ser resolvidas por método iterativo. Neste trabalho, o dimensionamento foi feito com auxílio do *software* EES. Depois de definidos os pontos das Figuras 3.3 e 3.4, o método segue com a determinação da variações das equações 3.7 e 3.8 em função de δ .

3.2 EFEITO DO SISTEMA DE RASTREAMENTO SOBRE A GEOMETRIA DO CONCENTRADOR SCHEFFLER

Como já descrito nas seções anteriores, o concentrador Scheffler possui dois sistemas de rastreamento individuais. O sistema de rastreamento diário funciona com um eixo paralelo ao eixo polar da Terra, com velocidade angular de $15^\circ/\text{h}$, e, somente no equinócio, é coincidente com o ponto na parábola onde $dy/dx = \tan 45^\circ$. A inclinação α , definida nas equações 3.18 e 3.19 mantém o refletor balanceado sobre esse eixo a fim de minimizar os esforços estruturais e o consumo de energia do mecanismo. O funcionamento desse sistema

rastreamento tem sido feito com motor elétrico alimentado por placa fotovoltaica (MUNIR et al., 2014) ou por mecanismo de pêndulo e contrapeso (HASHMI et al., 2018).

O sistema de rastreamento sazonal funciona com um eixo e um pivô. O eixo é perpendicular ao plano do perfil da parábola do refletor no ponto de $dy/dx = \tan 45^\circ$. O pivô é um ponto fixo localizado em $dy/dx = \tan \alpha$. Ambas as tangentes são para $\delta = 0$. A amplitude do movimento do eixo é de $\pm 23,45^\circ$. A Figura 3.2 mostra dois perfis de refletores Scheffler sobrepostos para os extremos de δ . Durante a movimentação do sistema de rastreamento sazonal, o pivô força a mudança da curvatura da parábola para manter a imagem focal no mesmo local. Essa mudança na curvatura está exposta na Figura 3.5, para as posições Scheffler Norte e Scheffler Sul nos dois solstícios ($\delta = \pm 23,45^\circ$) e nos equinócios.

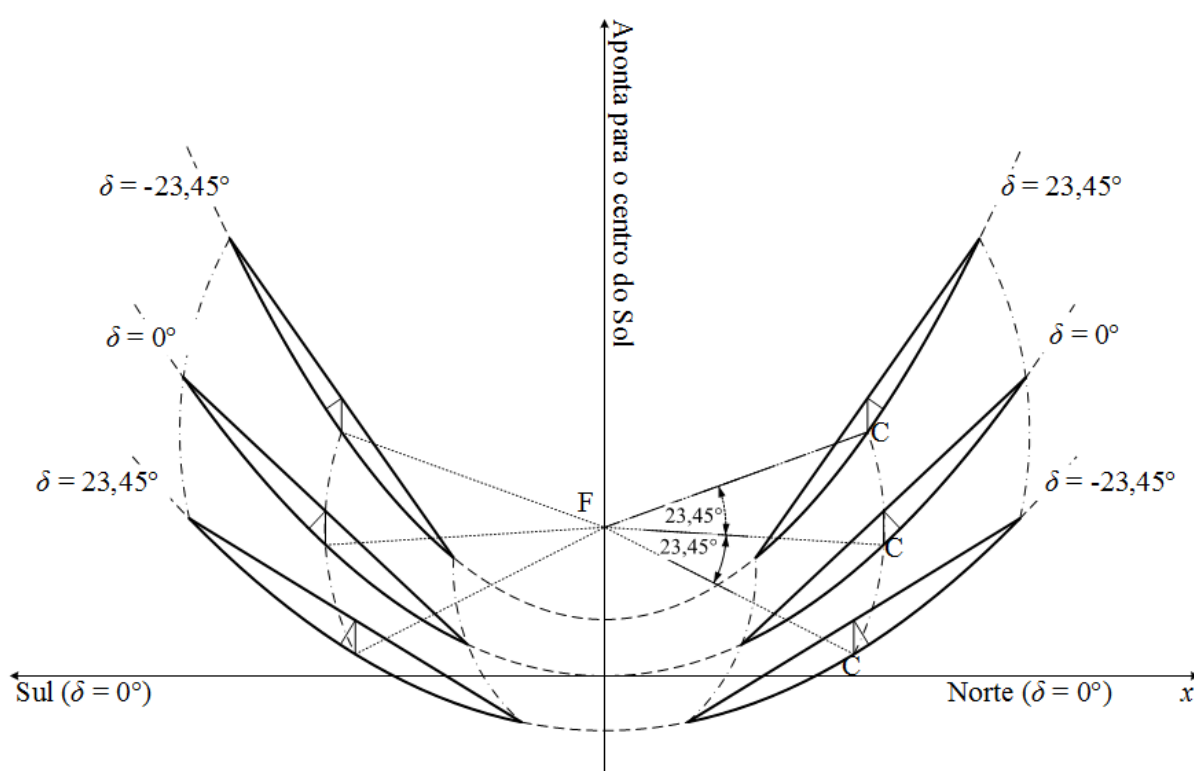


Figura 3.5 – Variações no perfil da parábola devido ao sistema de rastreamento sazonal para o Scheffler Norte e o Scheffler Sul nos solstícios e no equinócio (DIB; FIORELLI, 2015a).

A Figura 3.6 mostra que o plano de formação da imagem focal é sempre perpendicular ao eixo do sistema de rastreamento diário. O eixo y só coincide com o plano da imagem focal no equinócio. Durante a funcionamento do sistema de rastreamento, a inclinação do plano de formação da imagem focal e a distância entre o pivô e o foco permanecem constantes. Na Figura 3.5, o pivô é o ponto C. No espaço físico, esses dois pontos e o plano focal são estáticos, enquanto o eixo y do sistema de coordenadas xy segue apontado constantemente para o centro do disco solar.

Para calcular os dados para a curva do perfil do concentrador solar no plano

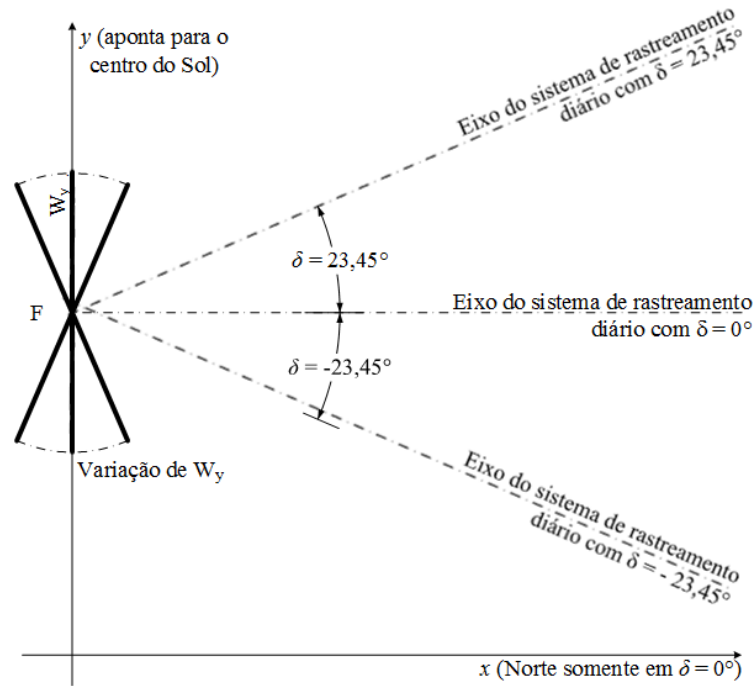


Figura 3.6 – Movimento do plano da imagem do foco em relação ao plano xy . (DIB; FIORELLI, 2015a).

cartesiano em qualquer dia n do ano, pode-se considerar que o ponto C faz um movimento circular em torno do ponto F, que é o foco da parábola para qualquer δ . O ponto C para um dado dia n , C_n , pode ser calculado em função de δ pela matriz de rotação da Equação 3.20. Então, todas as variáveis da seção 3.1 podem ser recalculadas.

$$\begin{pmatrix} \cos \pm \delta & \sin \pm \delta \\ -\sin \pm \delta & \cos \pm \delta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_{c,eq} \\ y_{c,eq} - f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{c,n} \\ y_{c,n} \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

onde $x_{c,eq}$ e $y_{c,eq}$ são as coordenadas cartesianas do ponto C no equinócio, $x_{c,n}$ e $y_{c,n}$, são as coordenadas do ponto C para o dia n do ano, f é a distância entre o vértice e a diretriz da parábola. O sinal \pm para δ é referente à posição do refletor em relação ao foco.

Os efeitos do sistema de rastreamento sazonal modificam a inclinação de α conforme a equação 3.3, e os ângulos de vértice variam entre $23,1^\circ \leq \chi_a \leq 78,6^\circ$ e $91,2^\circ \leq \chi_b \leq 127,6^\circ$. Para um receptor com abertura no plano da imagem focal (Figura 3.6), os ângulos de borda podem ser definidos como os ângulos entre o eixo do sistema de rastreamento diário e a linha entre o ponto F e as extremidades A e B do refletor, ϕ_a e ϕ_b , respectivamente. A variação desses ângulos pode ser observada na Figura 3.2, e estão entre $34,35^\circ \leq \phi_a \leq 42,93^\circ$ no ponto A, e $14,62^\circ \leq \phi_b \leq 25,19^\circ$.

Uma simulação com o *software* EES foi feita com as equações acima para verificação da curva da área de abertura, A_{ap} , em função de δ para os concentradores Scheffler Norte e Scheffler Sul, ambos com $A_{ap} = 1\text{m}^2$ no equinócio (Figura 3.7).

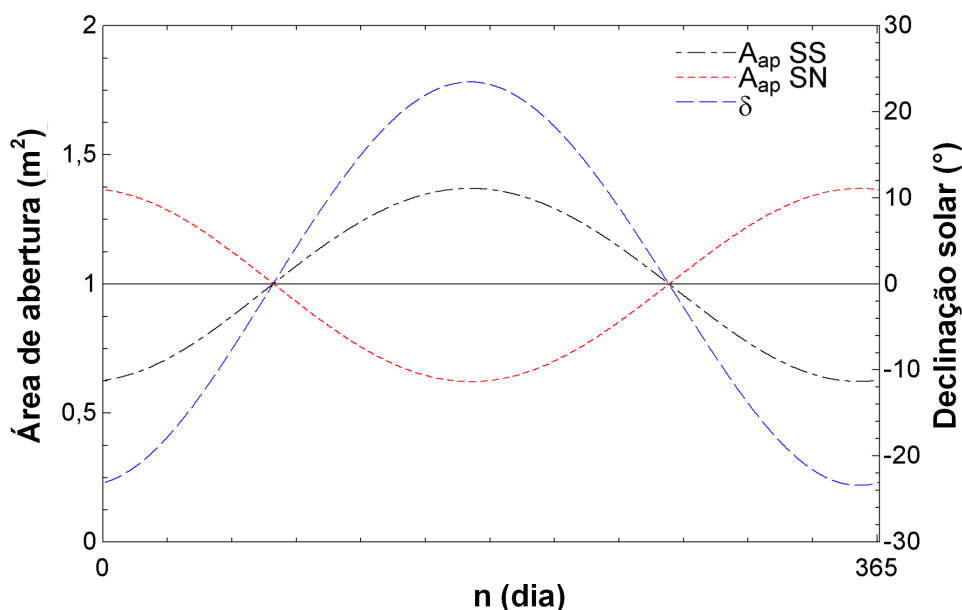


Figura 3.7 – Comparação entre as variações da área de abertura entre os concentradores Scheffler Norte (SN) e Scheffler Sul (SS) conforme a declinação solar (δ). (DIB; FIORELLI, 2015a).

Como esperado, a Figura 3.7 mostra que a área de abertura dos concentradores variam de forma inversa. O dia n em que as curvas das áreas de abertura dos concentradores CSN e CSS se cruzam, corresponde aos dias do equinócio. Os valores máximos e mínimos dessas curvas ocorrem nos solstícios, e são de $1,37 \text{ m}^2$ e $0,62 \text{ m}^2$. Os valores das curvas da Figura 3.7 expressam variações ideais do refletor. A variação da área de abertura real depende do comportamento de deformação da estrutura do refletor devido a tensão provocada pelo pivô (ponto C) do sistema de rastreamento sazonal. A deformação estrutural do refletor varia de acordo com o projeto, pontos de solda e materiais utilizados.

Os concentradores tipo prato parabólico possuem a superfície refletiva estática, i. e., não há deformação com o funcionamento do sistema de rastreamento, mas podem se deformar por outros motivos, por exemplo, devido à força de arrasto do vento, como demonstrado por Skouri et al. (2015), em uma análise da variação da geometria do refletor por técnica de fotogrametria. Portanto, a área de abertura é constante e a quantidade de energia disponibilizada na imagem focal depende da refletividade e imperfeições do espelho e de condições climáticas. A quantidade de energia que o concentrador Scheffler disponibiliza na imagem focal varia também com as curvas de $A_{ap,n}$ ilustradas na Figura 3.7. A definição da área da elipse do concentrador Scheffler, A_s , para construção, deve ser realizada de forma iterativa entre $A_{ap,n}$ e a curva de demanda.

4 A FORMAÇÃO DE IMAGEM

Os estudos para otimização de receptores para concentradores solares são feitos conhecendo-se o perfil do fluxo de energia na imagem focal, conforme exposto na seção 2.3. Trabalho como o de Ruelas et al. (2014) apresenta a formação de imagem do concentrador Scheffler em ambos os solstícios. Mas, paralelamente aos estudos vistos na seção 2.3, há a oportunidade de aprofundamento na formação de imagem dos concentradores solares do tipo Scheffler. Pesquisas como Shuai, Xia e Tan (2008) e Reddy, Natarajan e Veershetty (2015), fazem comparações de resultados do perfil de fluxo de energia na imagem focal com os trabalhos de Jeter (1986) e Johnston (1995b), que utilizaram método numérico e *Ray Tracing*, respectivamente. As comparações foram feitas entre concentradores solares tipo prato parabólico com ângulo de borda, ϕ_r , de 45° e 60° .

Esta seção desenvolve modelagem para determinação da curva de fluxo de energia na imagem focal do concentrador tipo Scheffler que possuem ângulos de borda (ϕ_r), ou de vértice (χ) padronizados e variáveis em função da declinação solar. O modelo de cone ótico, citado por Duffie e Beckman (2013) é utilizado para definição da formação de imagem focal em concentradores parabólicos, e foi utilizado como base da modelagem dessa seção, e modificado para o concentrador Scheffler. O ângulo da incidência de radiação solar direta normal, $I_{b,T}$, em uma pequena área do refletor, dA , varia $\theta_s = 4,65$ mrad do centro do disco solar até a borda, e de 4,65 mrad até 30 mrad na porção circunsolar, segundo a distribuição de Neumann et al. (2002). Esse cone incidente possui ângulo de abertura de $2\theta_s$, com vértice em dA e base circular no Sol (30 mrad), é refletido com ângulo igual ao da incidência acrescido das imperfeições do concentrador solar, $(\theta_s + \theta_c)$. Essas imperfeições ocorrem devido ao espelho, à estrutura do refletor (suporte do espelho), dos sistemas de rastreamento, entre outros. Se uma placa plana for instalada no plano do foco do concentrador Scheffler e perpendicular com o eixo do sistema de rastreamento diário, a base do cone refletido será projetada. O Sol projetado na placa terá o formato circular, se dA for coincidente com esse eixo, ou, por outro lado, elíptica. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram a reflexão do cone ótico incidente no perfil do concentrador solar para a formação da imagem nos planos lateral (xy) e superior (xz), respectivamente.

As equações a seguir definem a estimativa dimensional da imagem focal para um cone ótico refletido por um elemento de área no refletor. Foi considerado que a imagem se forma em um plano com sistema de coordenadas F_y, F_z e coincidente com a zona focal. Seja F , das Figuras 4.1 e 4.2, a origem desse plano. Se for considerado o feixe incidente do centro do disco solar refletido para o foco nominal do concentrador, isto é, o ponto F , o comprimento fe pode ser calculado de acordo com a seguinte equação:

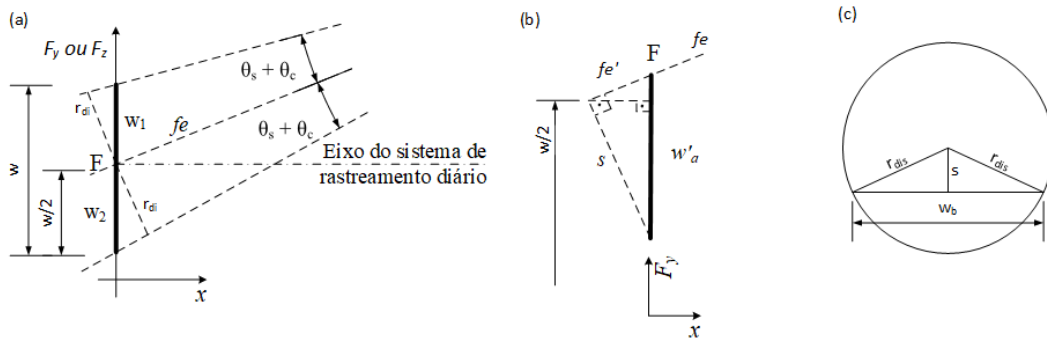


Figura 4.3 – Geometria para modelagem (a) de w_a , w_y e w_z , (b) e (c) do eixo menor da imagem, w_b .

A Figura 4.3a é a representação generalizada da base do modelo para o cálculo dos eixos da imagem de um feixe. As dimensões w , w_1 e w_2 ganham uma letra no subíndice com indicação do eixo considerado em cada uma das equações a seguir. No cálculo da largura da imagem sobre o eixo y , da Figura 4.1, por exemplo, as variáveis passam a ser w_y , w_{y1} e w_{y2} , e o eixo do sistema de coordenadas é F_y . Quando o interesse é o dimensionamento sobre o eixo z , da Figura 4.2, as variáveis têm o indicativo z e o eixo das ordenadas é F_z . Para o eixo maior da imagem, as variáveis são indicadas com letra a no subíndice. O ponto F das Figuras 4.1 e 4.2 é o mesmo da Figura 4.3.

O eixo maior da imagem, w_a , é dado por:

$$w_a = w_{a1} + w_{a2} \quad (4.2)$$

onde w_{a1} é o lado superior F até a borda da elipse da imagem no lado de ϕ_{wa} (ver Figura 4.3), é dada por:

$$w_{a1} = fe \times \frac{\sin \theta_c}{\sin (\phi_{wa} + \theta_c)} \quad (4.3)$$

e w_{a2} é a distância de F até a borda da elipse da imagem no lado de $180 - \phi_{wa}$, (ver Figura 4.3) e é dado por:

$$w_{a2} = fe \times \frac{\sin \theta_c}{\sin (\phi_{wa} - \theta_c)} \quad (4.4)$$

O ângulo entre fe e w_a , ϕ_{wa} , é calculado por:

$$\sin \phi_{wa} = \frac{x_{fe}}{fe} \quad (4.5)$$

O eixo menor da elipse da imagem de um feixe fe , w_b , ocorre no ponto central de w_a . A Figura 4.3b mostra uma extensão do feixe, fe' , até o ponto onde uma reta perpendicular

com w_a seja coincidente em $w_a/2$. A reta auxiliar s é perpendicular com fe' e conecta esse à w_a . A reta w'_a é a porção de w_a entre F e o encontro de s e w_a . O círculo da Figura 4.3c está em um plano perpendicular à Figura e coincidente com a reta s . Esse círculo de raio r_{dis} , que é a base do cone óptico refletido com feixe de comprimento $fe + fe'$, mostra que a reta s é a distância entre o eixo menor da imagem de um feixe, w_b , e o ponto onde $fe + fe'$, e que w'_a é a distância entre w_b e o ponto F . O eixo menor é calculado pela seguinte equação.

$$w_b = 2\sqrt{r_{dis}^2 - s^2} \quad (4.6)$$

para as retas auxiliares,

$$s = w'_a \sin \phi_{wa}$$

$$r_{dis} = (fe + fe') \tan (\theta_c + \theta_s)$$

$$w'_a = \frac{w_a}{2} - w_{a1}$$

$$fe' = w'_a \cos \phi_{wa}$$

O eixo w_y é a largura da imagem sobre o eixo F_y . w_{y1} é a dimensão no lado superior de F (ver Figura 4.3a).

$$\left\{ \begin{array}{ll} w_{y1} = fe \frac{\sin \theta_c}{\sin(\phi_{wy} - \theta_c)} & \text{se } \phi_{wy} < 90 \\ w_{y1} = fe \frac{\sin \theta_c}{\sin(\phi_{wy} + \theta_c)} & \text{se } \phi_{wy} > 90 \\ w_{y1} = fe \tan \theta_c & \text{se } \phi_{wy} = 90 \end{array} \right. \quad (4.7)$$

O lado w_{y2} corresponde à dimensão no lado inferior de F , e é dada por:

$$\begin{cases} w_{y2} = fe \frac{\sin \theta_c}{\sin(\phi_{wy} + \theta_c)} & \text{se } \phi_{wy} < 90 \\ w_{y2} = fe \frac{\sin \theta_c}{\sin(\phi_{wy} - \theta_c)} & \text{se } \phi_{wy} > 90 \\ w_{y2} = fe \tan \theta_c & \text{se } \phi_{wy} = 90 \end{cases} \quad (4.8)$$

onde ϕ_{wy} é o ângulo entre fe e o eixo F_y , e é dado por:

$$\cos \phi_{wy} = \frac{|y_f - y_{fe}|}{fe} \quad (4.9)$$

O eixo w_z é a dimensão da imagem no eixo F_z , e pode ser obtido pela soma de w_{z1} e w_{z2} , conforme as equações abaixo (ver Figura 4.3a).

$$\begin{cases} w_{z1} = fe \frac{\sin \theta_c}{\sin(\phi_{wz} + \theta_c)} & \text{se } \phi_{wz} < 90^\circ \\ w_{z2} = fe \frac{\sin \theta_c}{\sin(\phi_{wz} - \theta_c)} & \text{se } \phi_{wz} > 90^\circ \\ w_z = 2fe \tan \theta_c & \text{se } \phi_{wz} = 90 \end{cases} \quad (4.10)$$

onde ϕ_{wz} é o ângulo entre o feixe e o eixo F_z , e pode ser calculado por:

$$\cos \phi_{wz} = \frac{z_{fe}}{fe} \quad (4.11)$$

A Razão de Concentração Geométrica é a razão entre a abertura do concentrador solar e a abertura do receptor (DUFFIE; BECKMAN, 2013). Como este trabalho visa analisar a formação da imagem do concentrador, a razão de concentração geométrica foi considerada como sendo a relação entre a abertura do concentrador solar no dia n , $A_{ap;n}$, e o tamanho máximo da imagem no mesmo dia, $A_{f;n}$, conforme a equação abaixo:

$$C = \frac{A_{ap;n}}{A_{f;n}} \quad (4.12)$$

4.1 PERFIL DO FLUXO DE ENERGIA NA IMAGEM

Se for considerado que um número finito de feixes, n_{fe} , atinge a área de abertura do concentrador solar, com variação angular de $2\theta_s$, a energia em cada feixe pode ser

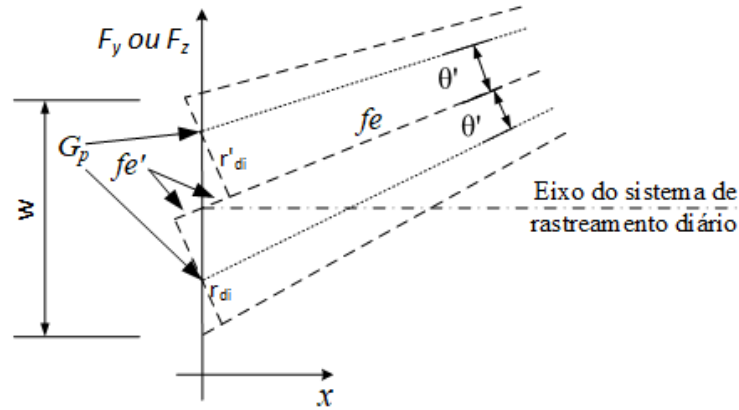


Figura 4.4 – Geometria de referência para modelagem do perfil de fluxo de energia do foco.

calculada pela seguinte equação:

$$G_{fe} = \frac{G_{bT} A_{ap}}{n_{fe}} \quad (4.13)$$

Após a reflexão, os feixes estão distribuídos em cone com abertura de $2(\theta_s + \theta_c)$. Para um dado comprimento de eixo do cone, fe , refletido em um espelho perfeito, a base perpendicular tem o mesmo perfil de fluxo de radiação que o disco solar. Para o perfil de "Sol quadrado", isto é, modelo de Sol que emite de forma difusa por todo o disco solar, o fluxo na base do cone é uniforme. Para um perfil de Sol medido, a curva do fluxo na base do cone é semelhante à curva de emissão no disco solar.

A Figura 4.4 representa a base para modelagem das equações para estimar o fluxo de energia do foco do concentrador solar Scheffler. As considerações iniciais são que fe atinge o ponto F e os eixos F_y e F_z estão no plano da zona focal. A distribuição do fluxo de radiação incidente no plano focal varia com o ângulo θ' e com o raio da base do cone, r_{di} , de cada feixe. O valor de θ' varia de 0 a $(\theta_c + \theta_s)$. A direção dos feixes variam ϕ_{wa} (equação 4.5).

O fluxo de radiação solar em um ponto, g_p , no plano focal, é a soma do fluxo incidente sobre r_{di} , onde a inclinação é θ' graus de fe , de todos os cones óticos refletidos. Para um mesmo g_p , θ' varia com a posição de fe . Para um cone, r_{di} é coincidente com g_p e perpendicular com fe . A distância entre F e o ponto coincidente entre r_{di} e fe é $\pm fe'$. A distância entre g_p e fe é r'_{di} . O ângulo do cone ótico com base de raio r_{di} é $(\theta_c + \theta_s)$, cujo cálculo é mostrado a seguir.

$$r_{di} = (fe + fe') \tan(\theta_c + \theta_s) \quad (4.14)$$

com fe calculado pela equação 4.1 e fe' conforme a seguinte equação

$$fe' = F_y \cos \phi_{wy} \quad (4.15)$$

onde F_y é a distância entre g_p e F no eixo F_y . O ângulo do cone ótico com base de raio r'_{di} é θ' , cujo cálculo é apresentado a seguir.

$$r'_{di} = |[F_y^2 - (fe')^2]^{1/2}| \quad (4.16)$$

onde r'_{di} é a distância perpendicular entre g_p e fe . F_y é a coordenada F_y do ponto g_p , e deve ser substituído por F_z se o estudo for sobre o eixo F_z . O ângulo θ' é calculado por:

$$\tan \theta' = \frac{r'_{di}}{fe \pm fe'} \quad (4.17)$$

O modelo de incidência solar medido por Neumann et al. (2002) é uma função de θ' que varia de 0 a 30 mrad, ou seja, do centro do disco solar até uma região da auréola que a maioria dos pireliômetros conseguem medir. Portanto, a energia incidente em um ponto g_p , pode ser calculada por:

$$g_p = \frac{G_{fe} I_r(\theta')}{\pi \bar{I}_r r_{di}^2} \quad (4.18)$$

onde o termo $G_{fe}/(\pi \bar{I}_r)$ é o fluxo médio de radiação na intensidade relativa média normalizada, \bar{I}_r , para o CSR correspondente. O termo $I_r(\theta')/r_{di}^2$ é o valor da intensidade para $I(\theta')$ de g_p . O valor de $I_r(\theta')$ corresponde à intensidade relativa para θ' , obtido na Tabela A por θ'_s , cuja relação pode ser feita da seguinte forma:

$$\theta'_s = \theta' \frac{\theta_s}{\theta_c + \theta_s} \quad (4.19)$$

O valor de \bar{I}_r é igual ao da intensidade relativa, I_r , que divide o sólido formado pela revolução da curva da Figura 2.40 no eixo de I_r , em duas partes de volumes iguais, $V_1 = V_2$, por meio da equação a seguir:

$$\int_0^{\bar{I}_r} \tan^2(\theta'_s) dI_r = \int_{\bar{I}_r}^1 \tan^2(\theta'_s) dI_r \quad (4.20)$$

para

$$\tan \theta'_s = f(I_r) \quad (4.21)$$

A função $f(I_r)$ pode ser encontrada por ajuste de curvas dos valores da Tabela A (ver Figura 2.40 para cada perfil de radiação circunsolar (CSR) disponível). O fluxo total em um ponto, G_p pode ser calculado conforme a equação abaixo:

$$G_{p,F} = \frac{G_{fe}}{\pi \bar{I}_r} \sum_{j=-z_m}^{z_m} \sum_{i=y_a}^{y_b} \left(\frac{I(\theta')}{r_{di}^2} \right)_{ij} \quad (4.22)$$

A equação 4.22 fornece o fluxo de energia teórico em cada ponto do plano da imagem. O subscrito F indica a localização do ponto em relação ao eixo F_y e/ou ao F_z . Os índices do somatório, i e j , indicam a localização do ponto dA , do vértice do cone ótico refletido sobre o espelho do concentrador solar, pelos pontos y_{fe} e z_{fe} . No cálculo, deve-se definir o passo para a resolução da curva, e, por outro lado, o tempo de processamento.

$$\gamma = \frac{\iint_0^{r_{abs}} G_f(y, z) dw_y dw_z}{I_{b,T} A_{ap} \zeta_a} \quad (4.23)$$

sendo que ζ_a é a fração da área real, A_a , sobre a área nominal, A_{ap} , do refletor. A função $G_f(y, z)$ são as curvas (ou superfície) de G_f nos eixos F_y e F_z , que estão mais bem discutidas na seção 5.2.3.1.

O perfil real do fluxo de calor possui oscilações irregulares, como visto na seção 2.4. A função $G_f(y, z)$ pode ser aproximada por equação gaussiana bivariada. Por método iterativo, a curva que mais se ajusta ao perfil real, pode ser substituída na função $G_f(y, z)$ da equação 4.23 (JOHNSTON, 1995b).

$$\frac{dG_f}{dydz} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{(-w_y^2 + w_z^2)/2\sigma^2} \quad (4.24)$$

A razão de concentração de fluxo local é a relação entre o fluxo de energia em um ponto na imagem focal e a incidência perpendicular, I_{bT} , que pode ser calculada por:

$$C_i = \frac{G_p}{I_{bT}} \quad (4.25)$$

onde C_i é a razão entre o fluxo em um ponto na imagem em relação à incidência de radiação solar direta ortogonal.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Como exposto no Capítulo 1, o objetivo geral deste trabalho é propor um modelo para a formação da imagem e para a curva do fluxo de energia na imagem focal formada por um concentrador solar de foco fixo do tipo Scheffler. Esse capítulo descreve os materiais e métodos utilizados para atingir tal objetivo. Assim, a primeira seção do capítulo descreve o método utilizado nas simulações feitas com o software *Engineering Equation Solver (EES)*, e a segunda seção detalha a bancada de testes com o concentrador solar fabricado, a estrutura e instrumentação utilizadas para as medições. O final do capítulo trata das incertezas de medição.

5.1 SIMULAÇÃO

O objetivo da simulação da formação de imagem focal do concentrador Scheffler foi, primeiro, dimensionar o refletor com as equações da seção 3.1 para o equinócio ($\delta = 0$). Com os pontos extremos e de interação com sistema de rastreamento do concentrador solar definidos (ver Figura 3.3) verificou-se, com auxílio da equação 3.20, a variação da posição desses pontos e do perfil da parábola do refletor no plano cartesiano em função da declinação solar (δ) causada pela ação do sistema de rastreamento sazonal.

Com a variação da inclinação e posicionamento do refletor obtidos, a segunda parte da simulação analisou da formação da imagem do concentrador solar. Inicialmente, considerou-se um concentrador com refletor ideal, isto é, no qual o cone ótico refletido possui a mesma abertura do cone ótico da incidência para verificar as variações da imagem focal com as máximas razões de concentração teóricas.

As equações geométricas da primeira parte do capítulo 4 foram utilizadas para definir a imagem de cada feixe refletido. O posicionamento de cada feixe sobre o refletor foi determinado a partir de meia área de abertura do concentrador solar. A área de abertura do concentrador solar, ortogonal à incidência, foi dividida pelo plano de simetria (plano xy) e, então, subdividida em uma matriz de 153 x 76. O processamento dessa matriz gera 11628 dados, função do limite de capacidade do *EES* (12000 dados). A diminuição dessa quantidade de dados melhoraria o tempo de processamento, mas diminuiria a resolução da simulação, a qualidade dos resultados teóricos. Depois dos processamentos de cada variável geométrica, os dados foram dobrados para uma matriz de 153 x 153, que compreende toda a área de abertura e com 18125 feixes refletidos. A diferença entre o total de dados e o número de feixes ocorre devido aos dados fora da área circular do concentrador. A simulação para a formação de imagem foi replicada para cada dia de declinação solar

média dos meses, para os solstícios e equinócio (linhas cinzas), conforme relacionado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Dias considerados para a simulação da formação de imagem.

Mês	Dia do mês	Dia do ano (n)
Janeiro	17	17
Fevereiro	16	47
Março	16	75
Março	21	80
Abril	15	105
Maio	15	135
Junho	11	162
Junho	22	173
Julho	17	198
Agosto	16	228
Setembro	15	258
Setembro	24	267
Outubro	15	288
Novembro	14	318
Dezembro	10	344
Dezembro	22	356

O perfil de fluxo de energia na imagem foi obtido com auxílio das equações da seção 4.1. O perfil de Sol considerado para as simulações dos 15 dias da Tabela 5.1, foi o perfil médio de emissão de radiação solar no disco mais a região circunsolar, \overline{CSR} , conforme a Tabela A. Para a análise comparativa dos dias das medições, o perfil de emissão considerado foi de acordo com a incidência de radiação direta e a Tabela A.1 e A.

A estrutura utilizada para as simulações foi um computador com processador Intel®Core™i7 com 2,7 GHz, 8 núcleos de processadores lógicos e 16 MB de memória RAM.

5.2 BANCADA EXPERIMENTAL

Para a bancada para medição da imagem focal do concentrador solar Scheffler foi utilizado um concentrador Scheffler com área de abertura A_{ap} de 2 m², um alvo lambertiano, uma câmera CMOS para captura da imagem do foco, e o sistema de aquisição de dados. A Figura 5.1 ilustra os itens da bancada experimental.

O local e posição de instalação da bancada mostrada pela Figura 5.1 foi definido por estudo prévio pelo diagrama de sombras para que a radiação direta atinja o concentrador



Figura 5.1 – Fotografia da bancada experimental.

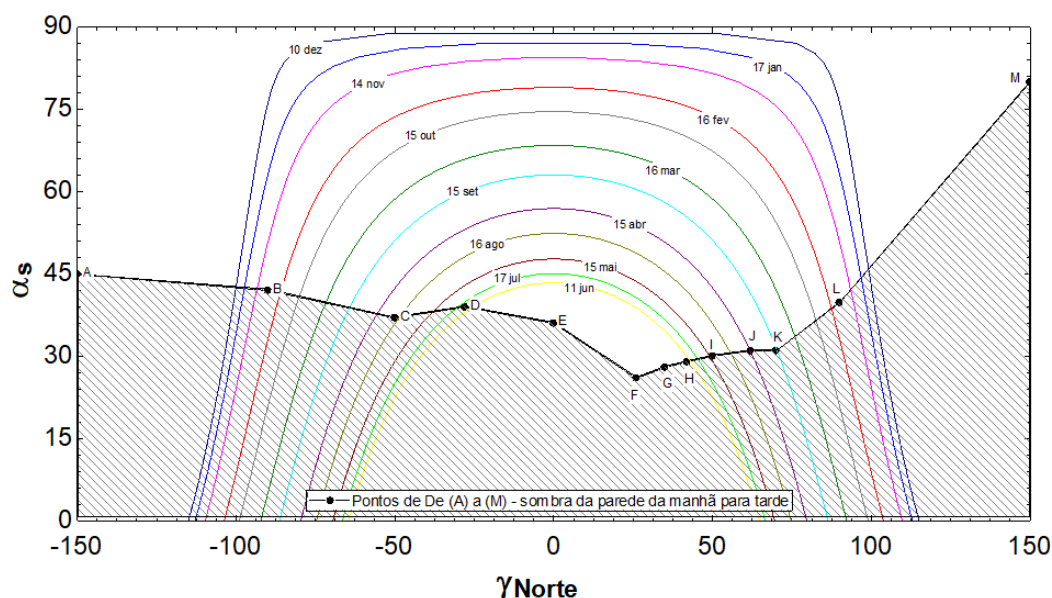


Figura 5.2 – Diagrama de sombra do local de instalação do concentrador solar Scheffler.

solar nos ângulos mais altos dos dias, entre 10 e 14 horas no tempo solar. A Figura 5.2 ilustra o diagrama de sombras com considerações de obstáculos da radiação solar.

O eixo das ordenadas da Figura 5.2 representa a altura angular, α_{sol} , em relação ao plano horizontal. O eixo das abcissas representa a direção azimutal em relação ao Norte, γ_{norte} . Cada uma das linhas da Figura 5.2 representa a variação de α_{sol} e γ_{norte} do Sol nos dias médios em relação à declinação solar em cada mês, os mesmos da Tabela 5.1, cujos pontos representam a hora solar to dia. O ponto em $\gamma_{norte} = 0$ refere-se ao meio dia solar. O dia evolui de $-\gamma_{norte}$ para γ_{norte} . A linha que compreende os pontos de (A) a (I) representam a altura e direção da vizinhança do concentrador solar, e a área abaixo dessa

linha compreende em períodos de sombra sobre o concentrador solar. Quando a linha da altura solar de algum dia está abaixo da linha da vizinhança significa que, naquela faixa de horário, há sombra sobre o concentrador solar, por exemplo, no dia 11 de junho, a radiação solar direta incide sobre o concentrador somente entre, aproximadamente, 10 h 30 min e 14 h 45 min do horário solar.

5.2.1 O CONCENTRADOR SOLAR

O concentrador solar construído para este trabalho possui área teórica de abertura A_{ap} de 2 m². Este projeto foi feito com base no manual disponibilizado pela Solare-Bruecke (2017). A Figura 5.3 ilustra as vistas lateral e traseira da estrutura do concentrador solar.

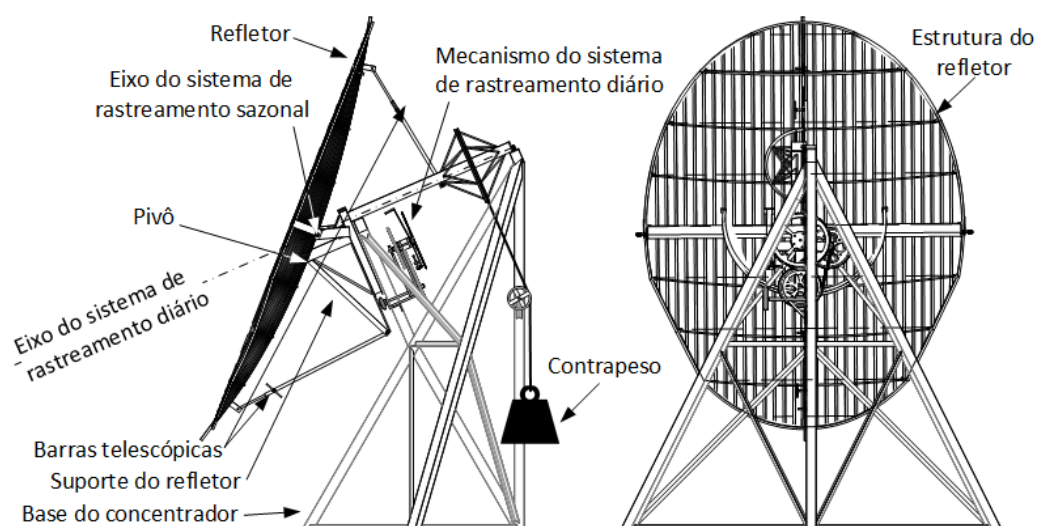


Figura 5.3 – Vistas lateral e traseira do concentrador solar.

Os componentes destacados na Figura 5.3, da estrutura do concentrador solar, mostram a **base do concentrador**, que é uma treliça espacial construída com perfis de aço carbono, o **refletor**, cuja estrutura é de aço carbono com barras de alumínio para apoio dos espelhos feitos com folhas de alumínio anodizado, o **suporte do refletor**, construído com perfis de aço carbono, tem a função de sustentar o refletor em sincronia com o sistema de rastreamento diário, o **sistema de rastreamento sazonal**, constituído de dois tubos telescópicos que modificam a inclinação do refletor e o **sistema de rastreamento diário**, composto pelo **mecanismo do sistema de rastreamento diário** e pelo **contrapeso**.

A base do concentrador (treliça espacial) sustenta o suporte do refletor e o mecanismo do sistema de rastreamento diário, que interagem entre si por meio de uma corrente. A base sustenta o conjunto do refletor em uma inclinação igual à latitude local. O contrapeso, conectado ao suporte do refletor por um cabo de aço, força o giro do refletor da posição da manhã para a da tarde. Os parafusos que prendem o suporte do refletor na base são o eixo do sistema de rastreamento diário. Esse movimento é transmitido para o

mecanismo de rastreamento pela corrente. A Figura 5.4 mostra em detalhe o mecanismo do sistema de rastreamento diário.

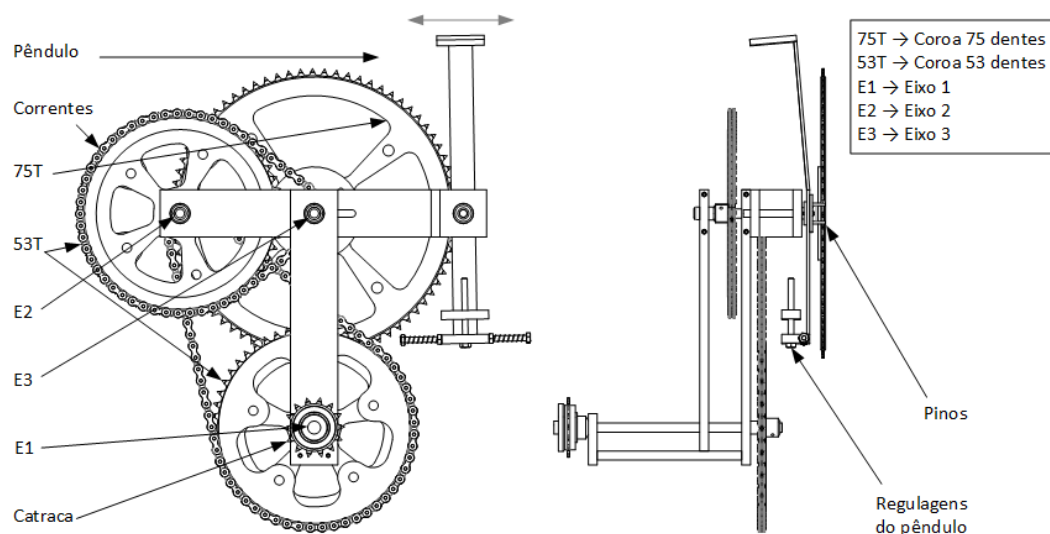


Figura 5.4 – Mecanismo do sistema de rastreamento diário.

O mecanismo do sistema de rastreamento da Figura 5.4 foi projetado para reduzir a velocidade de giro do refletor, devido à força exercida pelo contrapeso, para velocidade angular de $15^\circ/\text{hora}$. Esse movimento é transmitido do concentrador para a catraca, ligada à uma corrente instalada no suporte do refletor. A catraca está instalada no eixo E1, e retransmite a força para os eixos E2 e E3, respectivamente. No eixo E1, a força vai da catraca (14T) para a coroa 53T, que transmite para outra coroa 9T, no eixo E2, que, por outra coroa 53T, retransmite o movimento para outra coroa 9T, no eixo E3. A coroa 75T (eixo E3) interage com dois pinos de um pêndulo, que controla o movimento do sistema.

A regulagem da frequência e amplitude do pêndulo foi feita por ajuste de pesos em três parafusos (ver Figura 5.4). O tempo ideal para um ciclo do pêndulo para esse sistema é de $t = 2,068$ s. Para aproximar da frequência ideal, a calibração do pêndulo foi realizada pelo tempo de movimentação angular da estrutura do refletor. A medição do giro foi realizada com auxílio de um clinômetro instalado no suporte do refletor. As coroas 53T e a catraca 14T foram adquiridas em mercado local. O cálculo das posições dos três eixos e o dimensionamento das coroas 9T e 75T, fabricadas para este trabalho, foram feitos com base em PROVENZA (1996).

Na operação do concentrador Scheffler, quando o sistema de rastreamento chega no final do curso (final do dia), a catraca possibilita que o sistema seja reiniciado manualmente. Essa opção é feita em outros concentradores Scheffler que utilizam o sistema gravitacional como fonte de energia para rastreamento diário (HASHMI et al., 2018).

O sistema de rastreamento sazonal é acionado pelas barras telescópicas sinalizadas na Figura 5.3. De acordo com Scheffler (2006b), o ajuste pode ser feito a cada duas semanas. Esse ajuste é realizado manualmente. Com as barras telescópicas soltas, o refletor ganha

liberdade no eixo do sistema de rastreamento sazonal. O ajuste é feito pela movimentação e observação da imagem do foco. Dessa forma, o foco é redirecionado para a região correta e, então, prende-se o telescópio inferior. Em seguida, a barra telescópica superior deve ser ajustada na direção em que a imagem seja a menor possível, seja na posição estática ou tensionando-o para um dos lados.

O refletor é preso em cinco pontos: um em cada barra telescópica, dois no eixo do rastreamento sazonal e um pivô próximo à região central do refletor (indicado na Figura 5.3). A função do pivô é tensionar a superfície refletiva para ajustar o perfil da parábola quando o sistema de rastreamento sazonal é acionado. A intensidade (e equação) da curvatura da parábola muda nesse ajuste (ver Figura 3.5), que provoca a mudança da inclinação de α_s (equação 3.3) e modifica levemente as curvaturas de todas as partes estruturais do refletor.

Os espelhos instalados no concentrador deste trabalho foram os do tipo **MIRO-SUN® Weather-Proof Reflective 90**, feitos com folhas de alumínio anodizado fabricadas pela Alanod®. As dimensões das folhas vindas da fábrica foram 1,25 m x 2 m e 0,5 mm de espessura (ALANOD-SOLAR, 2010). O anexo B detalha as características físicas do espelho.

Esse espelho não flexiona em dois eixos. Portanto, não possibilita a instalação do espelho de forma contínua na curvatura da parabolóide. Dessa forma, as folhas de alumínio foram cortadas em pequenos retângulos para instalação. A dimensão do corte influencia no tamanho e na curva de fluxo da imagem focal. Quanto maior for a dimensão de cada espelho maior será o tamanho da imagem do foco e maior será o achatamento do pico do fluxo no foco (JOHNSTON, 1998; REDDY; KHAN, 2019).

Riveros-Rosas et al. (2011) analisaram, por *Ray Tracing*, a variação do fluxo de energia solar na imagem focal em concentrador tipo prato parabólico com refletor feito de espelhos planos com diferentes dimensões de cortes. Os autores realizaram a simulação em um concentrador ideal e em outro com erro do ângulo de reflexão em 4 mrad. Os autores consideraram um espaço quadrado sobre a área de abertura do concentrador em questão, para segmentar os espelhos em 6 x 6 (36 espelhos), 12 x 12 (144), 20 x 20 (400) e 30 x 30 (900 espelhos). Compararam, então, com o fluxo focal de um concentrador com espelho de curvatura contínua nos dois eixos. Foi verificado que, conforme o erro na reflexão aumenta, o pico de fluxo de energia no foco tende menores valores de F/D , que é a razão entre o comprimento focal (distância do vértice ao foco) e diâmetro da área de abertura. Observaram, também, que quanto menor for a dimensão dos espelhos, menos significativo é a variação na concentração do foco.

Contudo, realizar cortes pequenos podem tornar o trabalho de instalação exaustivo, e, possivelmente, aumentar os erros sistemáticos devido à construção e montagem manuais. Mas, sendo possível curvar as folhas em um eixo, os cortes foram feitos em retângulos de



Figura 5.5 – Superfície do alvo lambertiano antes (a) e depois (b) do tratamento superficial.

6,25 mm x 280 mm, totalizando 26 filas de espelhos, de forma a maximizar o aproveitamento das folhas **MIRO-SUN**[®].

Os espelhos foram instalados sobre as barras de alumínio da estrutura do refletor, representadas pelas barras verticais na Figura 5.3. A adesão entre os espelhos e as barras de alumínio foi feita com fita dupla face na mesma largura, 3/4 pol.. O lado maior dos espelhos (280 mm) foi instalado verticalmente de forma a acompanhar a curvatura da paraboloide. O lado menor se manteve reto, como segmentos de uma reta secante à curva da paraboloide.

5.2.2 ALVO LAMBERTIANO

O sistema de medição deste trabalho, assim como naqueles relacionados na Tabela 2.6 foi feito com um alvo lambertiano. Esse alvo consiste em uma placa metálica com tratamento superficial que visa a reflexão difusa. Uma superfície com reflexão difusa ideal recebe o nome de superfície lambertiana, como visto anteriormente.

O alvo lambertiano deste trabalho foi construído com uma placa de aço carbono, com dimensões de 1,0 m x 0,6 m. Um dos lados da placa recebeu jateamento de granalha de aço para obtenção de rugosidade, e, em seguida, alumina (Al_2O_3) foi aplicada por aspersão térmica. A Figura 5.5 mostra o alvo (a) antes e (b) depois do tratamento superficial.

A calibração do alvo lambertiano foi realizada segundo sugestão de Ballestrín et al. (2018). Esse processo ocorreu em duas etapas. Na primeira, foi feita a análise de uniformidade da luminosidade da superfície do alvo. Duas fotografias da superfície do alvo foram feitas com câmera fotográfica comum de telefone celular (com 12 megapixels, nesse caso), uma antes e outra depois do tratamento superficial (Figura 5.5). Com auxílio do *Matlab*[®], as duas imagens foram convertidas em escala de cinza utilizando a função `rgb2gray` para eliminar as propriedades individuais de cada cor e igualá-las na escala de cinza (BALLESTRÍN et al., 2018). O desvio padrão dos valores dos pixels foi considerado

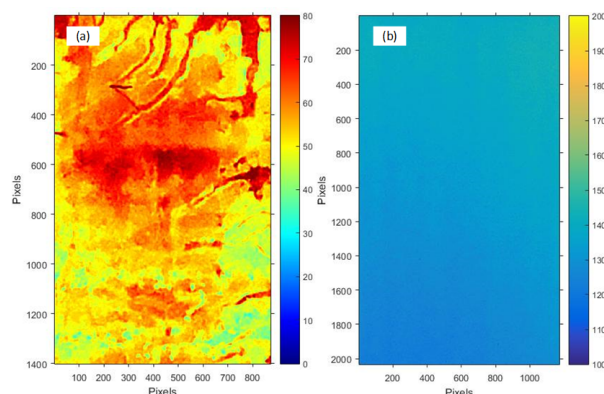


Figura 5.6 – Teste de homogeneidade entre as superfícies do alvo lambertiano (a) antes, com desvio padrão de 9,3 (16,4%) e (b) depois do tratamento com desvio padrão de 3,0 (1,5%).



Figura 5.7 – Luminancímetro KONICA MINOLTA e modelo LS-110.

como a incerteza devido à uniformidade, δ_{alu} .

As Figuras 5.6a e 5.6b correspondem à análise da homogeneidade luminosa da superfície do alvo antes e depois do tratamento superficial. O desvio padrão dos valores da escala de cinza foram de 9,3 (16,4%) e 3,0 (1,5%), respectivamente.

A segunda etapa da calibração, segundo Ballestrín et al. (2018), consistiu no teste de intensidade da luminosidade em diferentes ângulos do hemisfério da superfície do alvo lambertiano. O instrumento utilizado na medição foi o luminancímetro da KONICA MINOLTA modelo LS-110 (Figura 5.7). Este sensor mede a luminância em cd/m^2 em um ângulo cônico de $1/3^\circ$.

A Figura 5.8 mostra a curva da variação da luminância da placa na condição da Figura 5.5b, com medições na faixa de -70° a $+70^\circ$ em intervalos de 10° . Nesse intervalo,

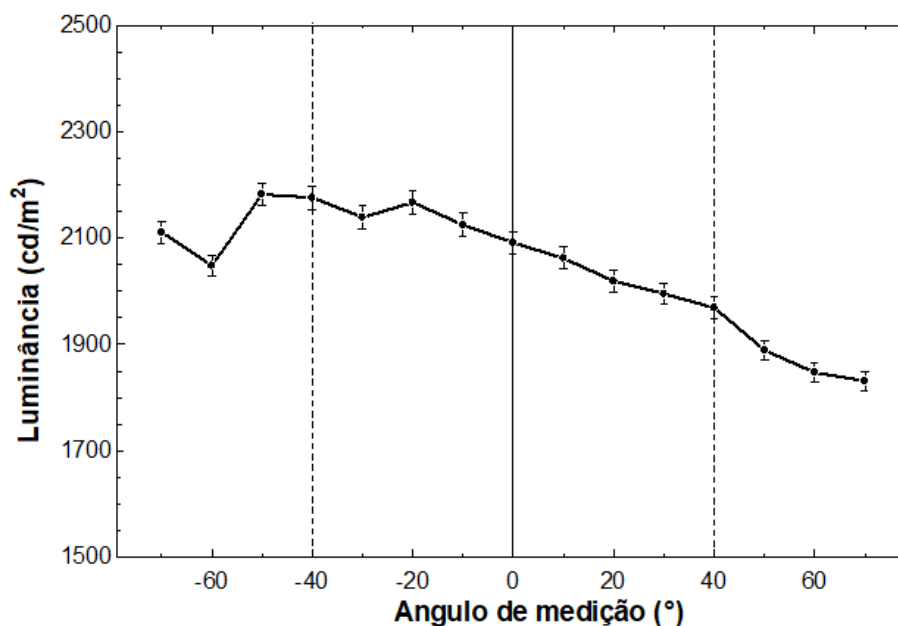


Figura 5.8 – Curva do teste de luminância.

o valor médio da luminância foi de 2043 cd/m^2 e o desvio padrão (δ_{all}) de $116,8 \text{ cd/m}^2$ (5,7%). Mas, se considerarmos o ângulo máximo entre a normal do alvo e o ponto mais distante do espelho, ou a câmera CMOS, a abertura a serem considerados nessa etapa pode ser no intervalo entre -40° e 40° , marcado pelas linhas tracejadas na Figura 5.8. Nesse intervalo, a média foi de 2083 cd/m^2 e o desvio padrão de $75,78 \text{ cd/m}^2$ (3,6%).

A tendência decrescente da curva da Figura 5.8, na região de interesse, indica uma assimetria na reflexão, que pode ser atribuída ao processo de fabricação durante a aplicação da camada de Al_2O_3 e/ou o jateamento não ter sido feito de maneira perpendicular, cujo resultado tenha sido a inclinação das cavidades da rugosidade.

A instalação do alvo lambertiano foi feita em um suporte com ajustes manuais em 3 graus de liberdade, para o posicionamento na zona focal: altura, distância frontal ao concentrador e ângulo da placa em relação à horizontal.

A mesma análise foi realizada previamente para definição do tratamento superficial do alvo lambertiano. O apêndice A apresenta o resultado para uma amostra com aplicação de alumina, por aspersão térmica, e de outra com aplicação de tinta à base de alumínio. A opção pela análise destes dois tratamentos foi devido à disponibilidade do mercado local.

5.2.3 CÂMERA CMOS

A câmera utilizada para registro da imagem focal foi uma FLIR, modelo BlackFly® GigE 88S6M-C PoE Monocromática, com sensor CMOS de resolução de 4096×2160 pixels, profundidade de pixel (capacidade da escala do gradiente monocromático) de 16-bits, velocidade de disparo de $22 \mu\text{s}$ a 30 s. A lente utilizada foi de 35 mm de comprimento focal.

Para atenuar a intensidade de iluminação foram instalados três filtros de densidade neutra de 0,9 OD e outro com ajuste de densidade regulável e máxima em 2,6 OD (Figura 5.9).

A aquisição de dados da câmera foi feita via cabo de rede com terminal RJ-45 em adaptador de rede com capacidade de velocidade de transferência de dados de 1000 Mbit/s. O *software* utilizado para aquisição de dados e calibrações foi o *SpinView*. Nesse *software* foi possível ajustar todos os parâmetros da câmera, como a velocidade de exposição, fatores que alteram o valor do pixel via algoritmo interno como nitidez e efeito gama, mitigação ou neutralização dos efeitos de corrente escura (um efeito análogo ao efeito fotovoltaico), que causa variações (ruídos) na cor do pixel, monitoramento da temperatura interna da câmera, e outros parâmetros que estão descritos no Apêndice B. Pelo software também se calibra pixels "defeituosos", que são aqueles que, em uma fotografia com a lente tampada, mostram valores muito acima de zero, que se destacam em tons visivelmente mais claros senão brancos. Foram corrigidos 226 pixels na região central do sensor.

A temperatura máxima de operação da câmera, recomendada pela fabricante, é em torno de 50°C. Para minimizar problemas e intensificar o resfriamento, um guarda Sol e um ventilador portátil foram instalados junto com a câmera no tripé, como mostra a Figura 5.9.

Essa temperatura influencia na corrente escura do sensor. Mesmo com o ajuste desse ruído no *SpinView* foi necessário realizar a devida calibração para se ter a incerteza desse ruído, δ_{ccc} . Após cada medição, foi capturada uma fotografia com a lente tampada. A análise para δ_{sce} foi realizada da mesma forma que àquela da uniformidade da luminosidade da superfície lambertiana (δ_{alu}).

O posicionamento foi feito de forma que a câmera ficasse o mais próximo possível do cruzamento entre os eixos dos sistemas de rastreamento diário e sazonal. A Figura 5.10 ilustra o esquema da posição da câmera em relação ao concentrador Scheffler e a zona focal nas vistas lateral e superior.

A projeção dos posicionamentos da câmera, do ponto F e dos eixos do sistema de



Figura 5.9 – Câmera com sensor CMOS, lente $f=1,3$ filtros 0,9OD e 1 filtro 2,6OD regulável.

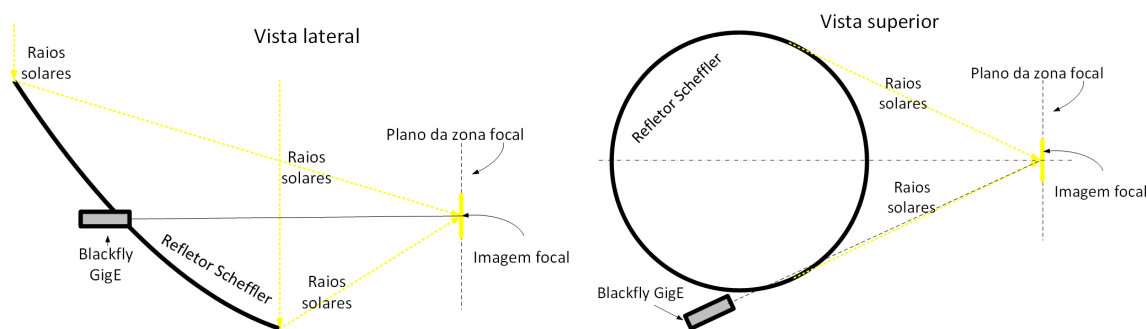


Figura 5.10 – Esquema do posicionamento da câmera CMOS em vista lateral e superior.

rastreamento foram marcados no chão (plano horizontal) com auxílio de prumo de centro e trenas (de fita e a laser) e barbantes, fixados por parafusos. Em cada dia de medição, as distâncias entre as projeções foram medidas. As incertezas devido aos posicionamentos da câmera, alvo lambertiano e concentrador estão relatadas na seção 5.2.4.

5.2.3.1 RELAÇÃO ENTRE ESCALA DE CINZA DO PIXEL E O FLUXO DE ENERGIA

Os trabalhos revisados na seção 2.4 mostram diferentes métodos para medição da imagem focal. A energia incidente em um pixel pode ser relacionado com o valor da escala de cinza por um fator F_{cinza} . Esse fator precisa ser calibrado, e três métodos podem ser destacados para tanto.

No primeiro método utiliza-se o alvo lambertiano como um calorímetro (Figura 2.47). Uma fotografia registra a imagem da energia refletida, enquanto que a energia absorvida é medida pela temperatura do alvo. A placa é dividida em duas partes concêntricas, separadas por um pequeno espaço de ar. Há sistema de refrigeração, que são individuais para cada parte. A parte central, o calorímetro, foi feita de cobre ligeiramente maior que a imagem. A placa maior foi feita de alumínio. As superfícies de ambas as partes concêntricas coincidiam no mesmo plano, e Al_2O_3 foi aplicada em ambas. A calibração desse sistema é feita por aquecimento elétrico de um fluido de refrigeração do calorímetro. Schmitz et al. (2017) verificaram uma relação linear entre a energia elétrica e a energia térmica do fluido. No teste sob o Sol, $Q_{el} = Q_{Sol} \rho_{concentrador} (1 - \rho_{Al_2O_3})$. Com base nisso, F_{cinza} foi calculado. A vantagem desse sistema é a ausência de interferências que dificultariam a estimativa das incertezas envolvidas e a facilidade de determinar o fluxo total na zona focal. A desvantagem é a sincronia entre o tempo de medição das temperaturas para o cálculo de Q_{flow} e o sistema de rastreamento diário do CSS, que rotaciona a imagem do foco, e a complexidade no projeto, construção e calibração dos sensores envolvidos em relação aos dois métodos seguintes.

O segundo método consiste na instalação de um ou mais medidores de Gardon (definição na seção 2.4) no alvo lambertiano e uma câmera. O alvo lambertiano pode ser fixo ou móvel. A distribuição do fluxo de energia é estimada via simulação. A calibração

desse sistema é feita pela equivalência entre o fluxo registrado no sensor e o valor dos pixels na região desse fluxo sem o sensor. As vantagens desse método é a boa determinação da distribuição do fluxo de energia na zona focal e a precisão em determinar a região do fluxo do sensor de Gardon na imagem registrada pela câmera. As desvantagens são a dificuldade na calibração devido aos pixels da borda do sensor, e no caso do alvo lambertiano fixo, na impossibilidade da câmera registrar o foco sem o sensor de Gardon, o sensor influencia a cor do pixel sobre o medidor e no entorno dele devido à diferença nas propriedades óticas e térmicas do material, o que torna necessário fazer uma interpolação que dificulta a estimativa do erro na região. O número de sensores de Gardon utilizado pode aumentar a complexidade do sistema de resfriamento (RÖGER et al., 2014; SCHMITZ et al., 2017). No caso do alvo lambertiano móvel, o tempo de ajuste do alvo pode aumentar a incerteza na medição devido ao sistema de rastreamento diário do CSS, que rotaciona a imagem do foco.

O terceiro método consiste em assumir que toda a energia refletida pelo concentrador solar atinge o alvo. Nesse caso, a medição de energia incidente é feita com um medidor de radiação solar (por exemplo um pireliômetro), e a energia refletida pelo concentrador é igual à integral dos valores da escala de cinza dos pixels. A distribuição do fluxo é estimada por simulação. A vantagem desse método é a boa estimativa da distribuição de fluxo e a facilidade da calibração de F_{cinza} em relação aos demais métodos. Segundo Schmitz et al. (2017), a desvantagem desse método é a alta incerteza das regiões periféricas da imagem focal, onde o fluxo de energia é mais baixo. No entanto, Röger et al. (2014) demonstram que, entre os métodos anteriormente citados, o último possui maior potencial de aplicação devido aos ajustes necessários serem menores que os outros sistemas que possuem sensores de fluxo no alvo lambertiano.

Embora o custo total desse último método seja maior que os métodos com um único medidor de Gardon em função do custo de um medidor de radiação solar direta, a Universidade já possui um medidor desse tipo no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG-USP), e por isso, a exemplo dos trabalhos de Ulmer et al. (2002) e Lovegrove, Burgess e Pye (2011), o terceiro método foi escolhido para a realização nas medições deste trabalho. O sensor utilizado foi um pireliômetro Eppley modelo PIR (Figura 5.11), cuja incerteza, δ_{pir} , é menor que 1% na medição de DNI (*Direct Normal Irradiance*).

O erro devido ao pireliômetro foi acrescentado ao valor da incidência de radiação direta perpendicular (I_{bT}), para o cálculo da intensidade do fluxo de energia em todo o foco ou em cada pixel. Já o erro devido ao posicionamento foi acrescentado às dimensões da imagem focal.

A relação entre o fluxo de energia no foco e a intensidade do valor na escala de cinza no pixel obedecem uma equação de primeiro grau. Por exemplo, o simulador de Levêque



Figura 5.11 – Pireliômetro EPPLEY modelo NIP.

et al. (2016) foi feito com 18 concentradores elípticos dimerizados. As lâmpadas foram divididas em dois grupos. O registro da câmera foi feito em dois tempos de exposição: 250 ms e 275 ms. O resultado foi duas intensidades de fluxo de energia com dois registros da câmera, cada. Como outro exemplo, o concentrador tipo prato parabólico de Ballestrín et al. (2019) tinha o controle na intensidade de fluxo feito por brises instalados na abertura do refletor. Dessa forma, o registro da câmera de Ballestrín et al. (2019) foi feito com diferentes intensidades.

Para relacionar o fluxo de radiação solar concentrada à escala de cinza da fotografia, Levêque et al. (2016) e Ballestrín et al. (2019) utilizaram um radiômetro na zona focal. A inclinação da curva de ajuste, portanto, é o fator de calibração F_{cinza} . As medições de Lovegrove, Burgess e Pye (2011) e Ulmer et al. (2002) foram com pireliômetro, sem radiômetro na zona focal. E, segundo os autores, pode-se escrever a seguinte equação.

$$G_f = F_{cinza} \times \sum_{ij} V_{cinza} \quad (5.1)$$

em que o termo $\sum V_{cinza}$ é a soma dos valores da escala de cinza de todos os pixels da imagem focal, obtidos por simulação em Matlab. G_f é o fluxo de radiação solar total no foco, e pode ser calculado como:

$$G_f = I_{bT} A_{ap} \zeta_{ap} \pm \delta_{G_f} \quad (5.2)$$

com o fator de área útil dos espelhos calculado por

$$\zeta_{ap} = \frac{A_{ap} - A_e}{A_{ap}} \pm \delta_\zeta \quad (5.3)$$

a variável A_e é a somatória das áreas do refletor que não há espelhos, por exemplo, áreas entre espelhos e partes estruturais, como a barra central, que forma o eixo maior da elipse do concentrador Scheffler. Esses espaços foram medidos com paquímetro digital com pontas de polímero para não danificar os espelhos. O cálculo do fluxo na área de um pixel foi feito pela equação a seguir.

$$g_{f,ij} = F_{cinza} V_{cinza,ij} \quad (5.4)$$

onde $g_{f,ij}$ representa o fluxo de energia em um pixel, $V_{cinza,ij}$ o valor da escala de cinza em um pixel na linha i e coluna j da fotografia e σ_t a incerteza total da medição.

5.2.4 INCERTEZAS DAS MEDIÇÕES

As incertezas citadas anteriormente, detalhadas nesta seção, foram calculadas para definição da qualidade de dados dos resultados do capítulo 6, para as dimensões da imagem do foco e para o fluxo em cada pixel do registro da câmera.

As incertezas dimensionais foram geradas desde a marcação da direção Norte-Sul, no posicionamento do concentrador solar e do alvo lambertiano até a localização da câmera CMOS em relação à imagem focal. As incertezas na medição do fluxo foram geradas no medidor de radiação solar direta perpendicular (DNI), na medição da área real do concentrador solar, na uniformidade direcional do alvo lambertiano e no registro da câmera CMOS. A Tabela 5.2 apresenta os instrumentos utilizados e as respectivas incertezas.

Tabela 5.2 – Instrumentos utilizados e as incertezas.

Instrumento de medição	Incerteza
Pireliômetro	1%
Paquímetro com bico de polímero	$\pm 0,03$ mm
Clinômetro	$\pm 0,15^\circ$
Escala graduada	$\pm (100 + 0,15L)$ μm
Medidor de distância a laser	$\pm 1,5$ mm
Trena de fita	$\pm 0,6$ mm se $L \leq 1$ m $\pm (0,6 + L/5000)$ mm se $L > 1$ m

A medição da distância entre o alvo e o refletor foi feita com a trena a laser a partir do alvo, direcionada para uma região na estrutura central do refletor com largura de 5 mm e inclinação em relação ao eixo de 45°. Essa faixa limitadora foi acrescida na incerteza dessa medição como 5 mm \times cos 45 para o alvo. A influência dessa incerteza na dimensão da imagem, δ_{rad} , depende do ângulo entre o feixe (eixo do cone de reflexão) e o eixo do sistema de rastreamento diário, φ . A função a seguir foi utilizada para o cálculo do erro dimensional δ_{rad} da imagem.

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

O alinhamento entre o concentrador e o alvo lambertiano, δ_{aca} , é função do direcionamento do concentrador para o Norte, do Alvo lambertiano para o Sul e da marcação da direção Norte-Sul no solo. Como já mencionado, a marcação no solo foi feita pela marcação da sombra de uma haste ortogonal ao plano horizontal, ajustada com clinômetro, ao meio dia solar, δ_{NS} . Após a marcação coincidir três dias consecutivos, intervalados em, pelo menos, 7 dias, foi feita uma marcação permanente para referência com um barbante esticado. O alinhamento do concentrador solar, δ_{aco} , foi feito pela medição de paralelismo distante em 1 mm entre um barbante esticado sobre a direção Norte-Sul e uma barra na estrutura do concentrador.

O alinhamento do suporte do alvo lambertiano (δ_{aal}) foi feito pela marcação do centro nos dois lados perpendiculares da base quadrada desse suporte ao barbante de referência. Com auxílio de um prumo de centro fixado nessas marcações, o suporte foi posicionado sobre o barbante. A incerteza devido à inclinação do alvo, δ_{ial} , realizada com o clinômetro, foi calculada segundo a função a seguir

$$\delta_{ial} = w_y \left(\frac{\sin [\varphi - (\theta_c + \theta_s)]}{\sin [180 - 0,15^\circ - \varphi + (\theta_c + \theta_s)]} - \frac{\sin [180^\circ - \varphi + (\theta_c + \theta_s)]}{\sin [\varphi - (\theta_c + \theta_s) - 0,15^\circ]} \right) \quad (5.6)$$

onde w_y é semieixo do eixo y considerado da imagem. A incerteza δ_{aal} ocorre da mesma forma que δ_{ial} , porém, sobre o eixo z da imagem focal.

$$\delta_{aal} = w_z \left(\frac{\sin [\varphi - (\theta_c + \theta_s)]}{\sin [180^\circ - 0,025^\circ - \varphi + (\theta_c + \theta_s)]} - \frac{\sin [180^\circ - \varphi + (\theta_c + \theta_s)]}{\sin [\varphi - (\theta_c + \theta_s) - 0,025^\circ]} \right) \quad (5.7)$$

A constante 0,025° corresponde ao ângulo máximo devido ao erro do ajuste do suporte em relação à direção Norte Sul. A estimativa da incerteza dimensional total do alinhamento entre o concentrador, o alvo lambertiano e a câmera foi calculada pelas equações a seguir, para os eixos y e z , respectivamente.

$$\delta_{aca,y} = \sqrt{\delta_{NS}^2 + \delta_{aco}^2 + \delta_{ial}^2 + \delta_{rad}^2 + \delta_{cac}^2} \quad (5.8)$$

$$\delta_{aca,z} = \sqrt{\delta_{NS}^2 + \delta_{aco}^2 + \delta_{aal}^2 + \delta_{rad}^2 + \delta_{cac}^2} \quad (5.9)$$

Onde δ_{cac} é a incerteza do posicionamento da câmera. O cálculo da incerteza do posicionamento da câmera foi feito a partir das medições dos lados de um tetraedro virtual, em que um dos lados foi o solo. Nesse lado triangular, um dos vértices foi a projeção do foco na linha de referência, outro vértice foi na projeção da câmera CMOS no solo e o terceiro vértice na linha de referência, o quarto vértice, que faz formar um tetraedro, foi a câmera CMOS. Todas as arestas foram medidas com trena de fita, exceto esse último, que foi com trena a laser. A equação a seguir foi utilizada para calcular a parcela de δ_{cac} na incerteza dimensional da imagem do foco.

$$\delta_{cac} = \sqrt{\left(\frac{\delta_{L1}}{L_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{L2}}{L_2}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{L3}}{L_3}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{L4}}{L_4}\right)^2} \quad (5.10)$$

onde de L_1 a L_4 correspondem aos lados do tetraedro, e de δ_{L1} a δ_{L4} , das incertezas na medição. Esse cálculo foi realizado individualmente em cada medição, pois depende da posição da câmera CMOS instalada no início de cada dia de medição realizada.

As incertezas das dimensões do foco devido ao sistema de rastreamento diário se apresentam como imprecisões na marcação dos eixos vertical e horizontal devido à rotação da imagem. Essas medições foram feitas pela medição da inclinação do giro refletor com um clinômetro instalado em uma barra na estrutura que gira em torno desse eixo, na mesma velocidade angular da Terra, imediatamente antes e depois da captura das imagens pela câmera CMOS. Antes do início das capturas da imagem focal, o sistema de rastreamento foi ajustado para a mesma inclinação horária do Sol pela comparação do ângulo e do horário oficial. Depois das capturas, foi considerada uma diferença de ângulo entre o clinômetro e o ângulo do horário solar, além da incerteza inerente ao medidor de ângulo, de $\pm 0,15^\circ$.

As incertezas devido ao sistema de rastreamento sazonal são difíceis de estimar. Apesar do ajuste dessa inclinação ter sido feito com clinômetro, o manuseio do sistema (variação de inclinação) foi feito de forma manual. Esse desvio foi considerado como desvio tangencial, que está embutido em θ_c , estimado pela equação 4.24 a partir das medições apresentadas no capítulo 6.

A propagação da incerteza na medição de energia em um pixel na imagem registrada pela câmera CMOS compreende na distância entre o valor de cinza do pixel e o fluxo médio real de energia solar concentrada na área do pixel. A quantidade de energia solar direta que atinge o refletor Scheffler na área de abertura real, A_a , tem a incerteza de 1% do pireliômetro, δ_{pir} , mais a incerteza da medição dos espaços da área morta do refletor (δ_c), isto é, os espaços que compreendem a estrutura do refletor e entre os espelhos, A_e (ver equação 5.3).

As incertezas geradas no alvo lambertiano, discutidas na sessão 5.2.2, são a variação da luminância com o ângulo de reflexão, δ_{all} e a uniformidade da luminosidade, δ_{alu} . Na câmera CMOS, as incertezas são devido à corrente escura, δ_{cce} e ao de vinheta, provocado pelo sombreamento devido ao espaço de tubo do sistema de lentes e filtros sobre o sensor CMOS, δ_{cvi} . O cálculo da incerteza total no fluxo de energia em todos os pixels pode ser determinado pela seguinte equação.

$$\delta_g = \sqrt{\left(\frac{\delta_{pir}}{DNI}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\zeta}}{A_e}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{all}}{\bar{I}_{all}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{alu}}{\bar{I}_{alu}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{cce}}{\bar{V}_{cinza}}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{cvi}}{\bar{V}_{vig}}\right)^2} \quad (5.11)$$

onde \bar{I}_{all} , \bar{I}_{alu} , \bar{V}_{cinza} e \bar{V}_{vig} são os valores médios da luminância, luminosidade dos pixels (fotografia feita sem a imagem focal), valores de cinza da fotografia com a lente da câmera tampada e análise de vinheta, respectivamente.

Os valores das incertezas dimensionais e de fluxo de energia na captura de imagem estão expostos nas Tabelas 5.3 e 5.4, respectivamente. Os valores das incertezas δ_{cce} , δ_{cvi} e δ_{ial} foram calculado após o registro em cada dia de medição devido às condições ambientais, que influenciam as incertezas da câmera CMOS, e das variações devido ao sistema de rastreamento sazonal, respectivamente, além dos totais δ_{aca} e δ_g .

Tabela 5.3 – Fontes de incerteza de medições dimensionais.

Fonte de erro	Instrumento de medição	Símbolo da variável	Valor
Distância entre alvo lambertiano e refletor	Trena laser	δ_{rad}	$\pm 1,5$ mm
Ortogonalidade do marcador da sombra Norte-Sul	Clinômetro	δ_{alp}	$\pm 0,15^\circ$
Alinhamento do concentrador solar para o Norte	Trena	δ_{aco}	$\pm 0,15^\circ$
Alinhamento do suporte do alvo lambertiano	Escala graduada	δ_{aal}	$\pm 0,07^\circ$
Inclinação do alvo	Clinômetro equação 5.6	e δ_{ial}	feito individualmente cada medição
Posicionamento câmera-alvo	Trena de fita + trena laser	δ_{cac}	feito individualmente cada medição
Alinhamento entre o alvo e o concentrador	Trena	δ_{aca}	feito individualmente cada medição

Tabela 5.4 – Fontes de incerteza de medições de fluxo de energia em todos os pixels.

Fonte de erro	Instrumento de medição	Símbolo da variável	Valor
Energia solar direta	Pireliômetro	δ_{pir}	1%
Espaço entre espelhos	Paquímetro com ponta de plástico	δ_{ζ}	$\pm 0,03$ mm
Uniformidade de luminosidade do alvo	Câmera simples e Fotografia e Matlab	δ_{alu}	3,0 (1,5%)
Luminância do alvo lambertiano	Luminancímetro	δ_{all}	3,6%
Corrente escura do sensor CMOS	Fotografia e Matlab	δ_{cce}	feito após cada medição
Vinheta	Fotografia e Matlab	δ_{cvi}	feito após cada medição
Incerteza total no fluxo em um pixel	Equação 5.11	δ_g	(valor em função do que será calculado no final)

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse Capítulo, a análise da formação de imagem é apresentada na seção 6.1 por meio de simulações utilizando as equações do Capítulo 3 para verificar variações dimensionais da imagem devido às variações de inclinação do refletor pelo sistema de rastreamento sazonal. O perfil de Sol considerado foi o "Sol quadrado", que emite radiação perfeitamente difusa, ou seja, a intensidade de feixe que sai do centro do disco solar é a mesma que sai da borda, com meio ângulo de até 4,73 mrad. Este valor foi definido com base na tangente do raio do disco solar sobre a distância entre Sol-Terra (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

A segunda parte apresenta resultados das simulações feitas a partir das equações do Capítulo 4 para as curvas do perfil de fluxo de energia solar nos eixos horizontal e vertical da imagem no plano perpendicular com o eixo do sistema de rastreamento diário. O perfil de Sol considerado na obtenção dos resultados apresentados na seção 6.2, foi aquele medido por Neumann et al. (2002), medidos até o meio ângulo de 30 mrad. Todas as simulações foram realizadas no software *Engineering Equation Solver* (EES).

A diferença na consideração nos dois perfis de Sol entre as duas primeiras partes é que, para medidas dimensionais, que podem ser utilizadas em projetos de receptores é melhor que a referência tenha menos variações possíveis. Já na segunda parte é o objetivo era conhecer o fluxo de energia na imagem do foco do CSS, logo a consideração da auréola, que varia conforme condições climáticas é mais adequada. Apesar disso, viu-se que a intensidade de fluxo nas regiões do foco provenientes somente da auréola é insignificante na comparação com as regiões do disco solar, porém essas regiões dificultam a definição da fronteira da imagem formada no foco do CSS por causar oscilações de borda.

A última parte dos resultados, apresentada na seção 6.3, mostra as medições da imagem de foco do concentrador construído neste trabalho e a aplicação das equações que definem o raio de partes das imagens consideradas nas duas primeiras seções desse capítulo. A abertura do cone de reflexão θ_c foi determinada por método iterativo e um único valor foi determinado para todas as medições. Ou seja, os resultados de cálculos apresentados na seção 6.1 foram aplicados na simulação apresentada na seção 6.2, e a seção 6.3 mostra como as dimensões w_y e w_z se ajustam razoavelmente bem com as imagens obtidas experimentalmente.

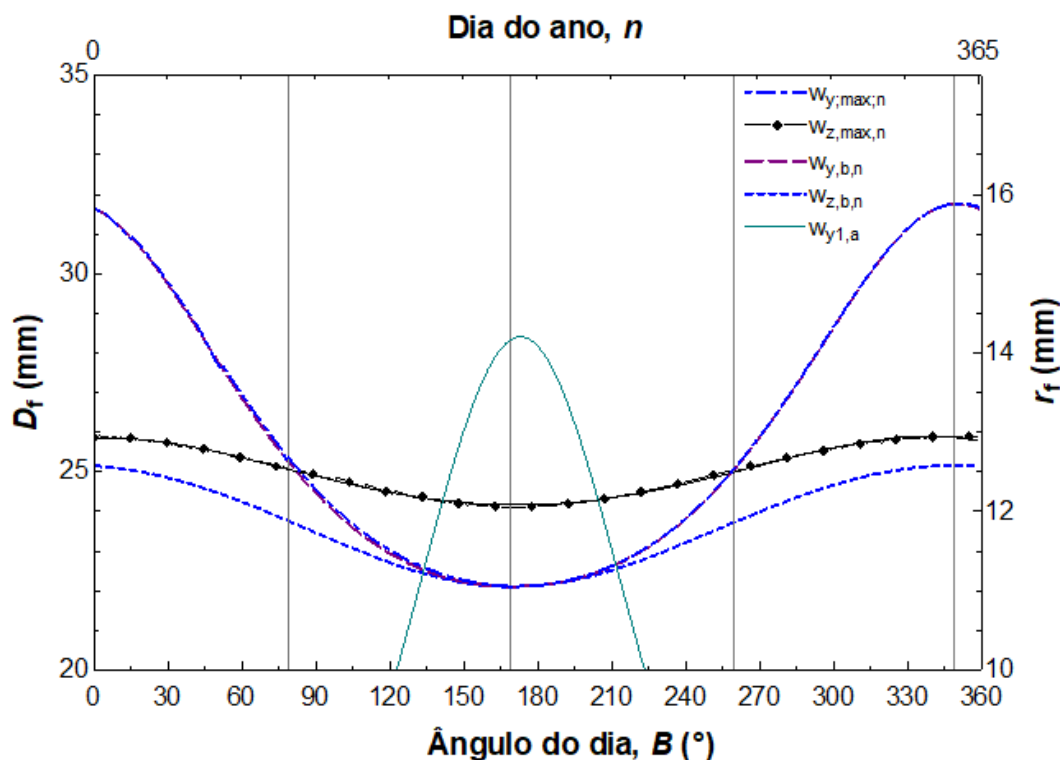


Figura 6.1 – Variação das dimensões máximas da imagem.

6.1 VARIAÇÕES DIMENSIONAIS DA IMAGEM

Para estas simulações considerou-se a área de abertura A_{ap} de 2 m^2 e reflexão ideal, isto é, sem desvios devido às imperfeições de materiais, construção, posicionamento, etc., para verificar as dimensões máximas teóricas.

A Figura 6.1 apresenta curvas das variações dimensionais dos eixos w_y e w_z da imagem projetada no plano yz , ortogonal com o eixo do sistema de rastreamento diário do concentrador solar. Quando as dimensões máximas não coincidiam com alguma extremidade do CSS, os cálculos foram processados no EES pelo método genético e representados na Figura pelas curvas $w_{y,max}$ e $w_{z,max}$, sobre os eixos y e z , respectivamente, com a escala em D_f .

A Figura 6.1 mostra que a curva da dimensão do semieixo w_y da imagem focal apresentou a maior intensidade de variação anual. Observa-se que a curva de $w_{y,max}$ coincide com a curva de $w_{y,b}$, que é a projeção do cone óptico refletido no ponto B, a extremidade mais distante do concentrador Scheffler. Por outro lado, a curva da variação dimensional do eixo w_z indicou menor variabilidade. O cálculo de $w_{z,max}$ mostra que o cone óptico refletido de outras regiões do refletor produz um eixo em z maior que o do ponto B (curva $w_{z,b}$). A regressão de dados da curva $w_{z,max}$ resulta na equação a seguir,

cuja correlação é de $R^2 = 0,9967$.

$$w_{z,max} = 25,8527 + 3,20555 \times 10^{-3}B - 2,75050 \times 10^{-4}B^2 + 1,54512 \times 10^{-6}B^3 - 2,24292 \times 10^{-9}B^4 \quad (6.1)$$

onde B é o ângulo do dia, com 0° à meia noite do primeiro dia do ano. Qualquer variável w_y ou w_z pode ser atribuída ao diâmetro de um receptor, D_f .

Para um CSS, nas datas próximas do Solstício de Câncer, afastadas em $n = \pm 39$, a curva de $w_{y1,a}$ produz o maior raio (r_f) (ver Figura 6.1). Isso ocorre devido a inclinação deste feixe em relação ao plano da zona focal ser o mais acentuado. Os valores do semieixo inferior da imagem focal $w_{y2,a}$ são 1,7% menores que $w_{y1,a}$ em $n = \pm 39$ da data do solstício, e 2,2% no dia do solstício.

Já as curvas dos semi eixos $w_{y1,b}$ e $w_{y2,b}$, que formam o eixo $w_{y,b}$ na Figura 6.1, possuem variação anual de $>0\%$ a 1% entre si, dos trópicos de Câncer à Capricórnio, respectivamente. Diferentemente do eixo w_y , o eixo w_z é centralizado em F devido a simetria do refletor no plano xy .

Para o concentrador Scheffler Norte, a imagem com maior w_y e w_z e a maior diferença entre $w_{y1,b}$ e $w_{y2,b}$ ocorrem no Solstício de Câncer. O cálculo dessas dimensões pode ser realizado pelas equações 4.7 e 4.8 para $\phi_{wy} > 90^\circ$.

A Figura 6.2 apresenta curvas das variações dos eixos da imagem w_y e w_z do feixe que produz o menor eixo. A variável d_o no eixo das ordenadas refere-se ao diâmetro do núcleo da imagem focal. O menor eixo pode ser considerado como núcleo da imagem, uma vez que todos os feixes contribuem para o fluxo de radiação solar concentrada nesta região.

A Figura 6.2 mostra que a curva do $w_{z,min}$ coincide com a imagem do feixe refletido no ponto A, a extremidade mais próxima do concentrador solar Scheffler, $w_{z,a}$. O eixo $w_{z,min}$ é simétrico no ponto F, o foco teórico da parabolóide. O eixo $w_{y,min}$ coincide com $w_{y,a}$ por 139 dias, centralizados no Solstício de capricórnio para o concentrador Scheffler Sul, ou no Solstício de Câncer, para o Scheffler Norte. Nos períodos entre os dias $n = 61$ e $n = 286$ há um descolamento das curvas de $w_{y,min}$ e $w_{y,a}$. A equação 6.2, com correlação de $r^2 = 0,9945$, pode ser usada para o cálculo de $w_{y,min}$ em milímetros, para o intervalo $61 \leq n \leq 286$.

$$d_o(w_{y,min}) = 1,7223 + 0,170466n - 4,91696 \times 10^{-4} \quad (6.2)$$

As curvas de $w_{y1,min}$ e $w_{y2,min}$, que somadas formam $w_{y,min}$, são as distâncias entre o ponto F e as extremidades verticais da elipse (consideradas ao meio dia solar), e podem ser calculadas pelas equações 4.7 e 4.8 para $\phi_{wy} < 90^\circ$. O raio do núcleo r_o pode ser

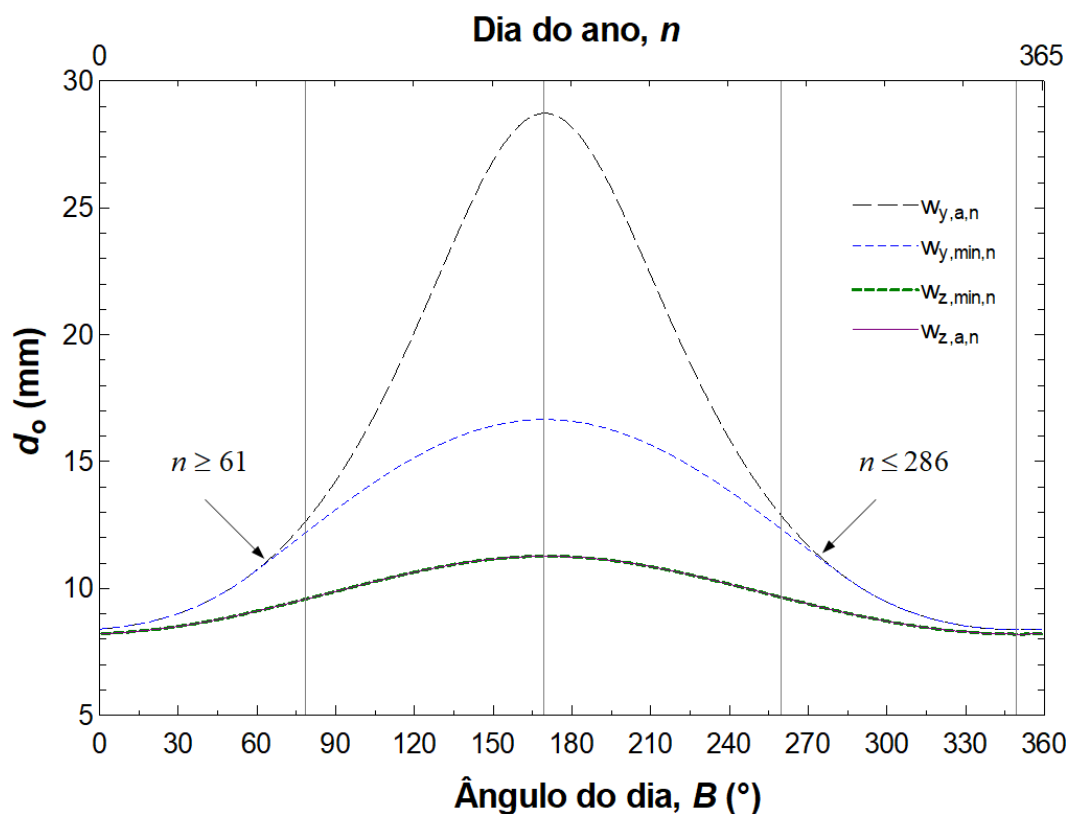


Figura 6.2 – Variação das dimensões mínimas da imagem.

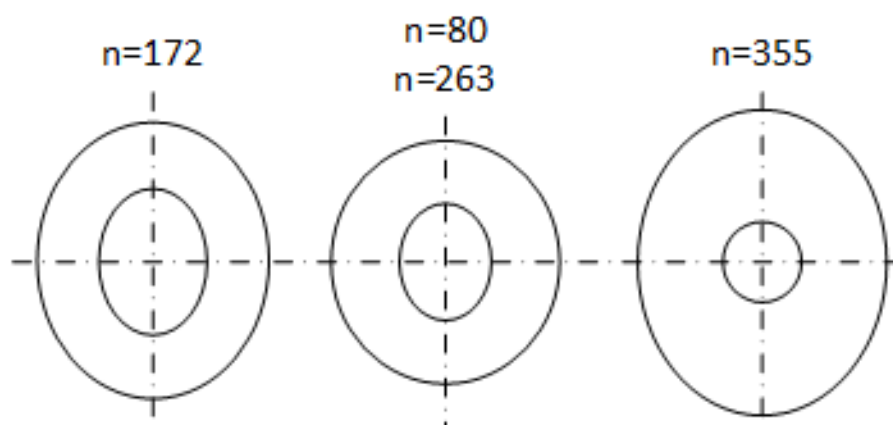


Figura 6.3 – Fronteira e núcleo da imagem focal com $\theta_c = 4,65$ mrad nos equinócios $n = 80$ e $n = 267$, solstício de câncer $n = 172$, e solstício de capricórnio $n = 355$.

entendido como $w_{y1,min}$, $w_{y2,min}$ ou $w_{z,a}/2$, que pode ser calculado pela equação a seguir.

$$r_o = \frac{f_e}{2} \times \tan \theta_c \quad (6.3)$$

Com base na simulação das curvas das Figuras 6.1 e 6.2, os contornos da fronteira e do núcleo ($d_o = w_{z,a}$) da imagem focal para os Solstícios de Câncer e Capricórnio e para os Equinócios para o concentrador solar Scheffler Sul estão representadas na Figura 6.3.

Nota-se que a dimensão do núcleo varia de forma diferente à dimensão da fronteira.

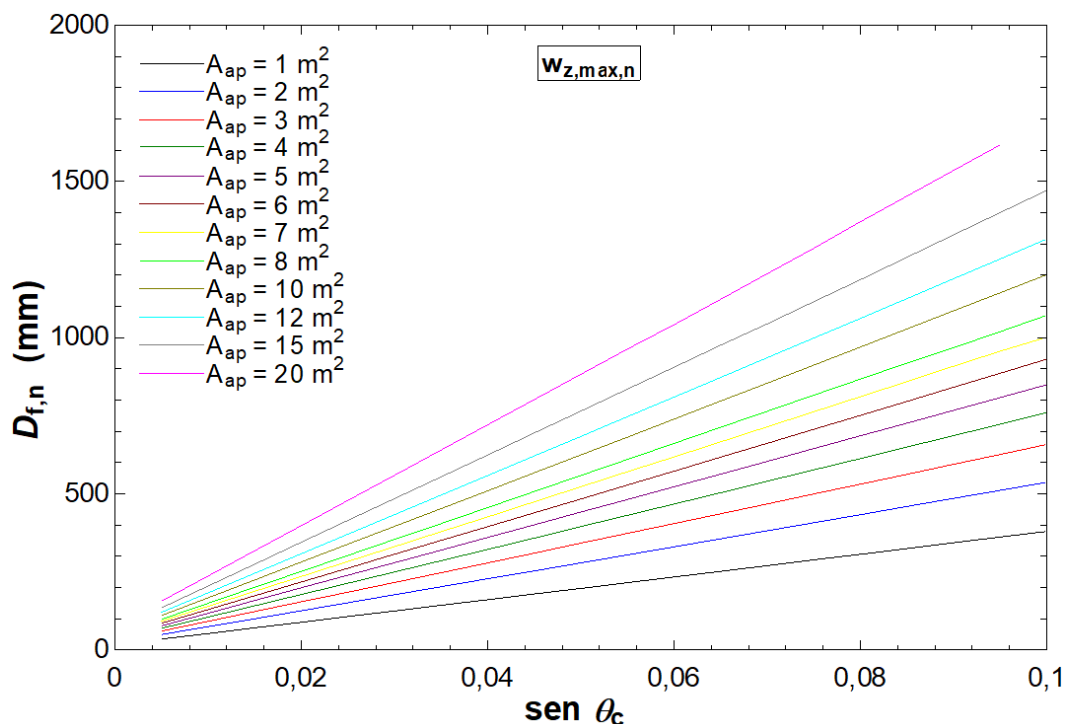


Figura 6.4 – Variação das dimensões máximas da fronteira da imagem em função da abertura do cone de reflexão.

Nessa Figura, a curva de variação do núcleo é produzida pelo feixe refletido no ponto A o ano todo. Diferentemente, o ponto de reflexão do feixe que projeta a maior fronteira varia conforme o período anual. Isso justifica a proximidade das dimensões de fronteira no Equinócio e Solstício de Capricórnio para o Scheffler Sul.

A influência da área de abertura A_{ap} e dos erros de reflexão θ_c sobre a dimensão da fronteira da imagem foi analisada nas Figuras de 6.4 a 6.7. Foi considerada a dimensão da fronteira $D_f = w_{z,max}$ no dia $n = 172$, da curva da Figura 6.1, de $A_{ap} = 2$ e $\theta_c = 0$. Com um suposto receptor de diâmetro $D_f = w_{z,max}$, segundo a curva da Figura 6.1, não haverá nenhuma época do ano de superfície absorvedora sem incidência de radiação solar concentrada.

Para os erros de reflexão θ_c levou-se em conta somente erros radiais, isto é, os feixes centrais dos cones refletidos atingem o ponto F e desprezou-se os erros tangenciais. A Figura 6.4 mostram que, para um dado valor de A_{ap} , a curva de variação de D_f em função de θ_c é de primeiro grau. A Figura 6.5 ilustra que as curvas da variação de D_f em função da área de abertura do refletor são uma função do segundo grau.

Da mesma forma, foi realizada a análise da influência de A_{ap} e θ_c no núcleo com diâmetro $d_o = w_{z,a}$ para o dia $n = 355$, o dia que apresentou o menor núcleo, de acordo com a Figura 6.2. A Figura 6.6 apresenta as curvas da variação de d_o em função de θ_c para diferentes A_{ap} , e a Figura 6.7, apresenta as curvas da variação de d_o em função de A_{ap} para diferentes θ_c .

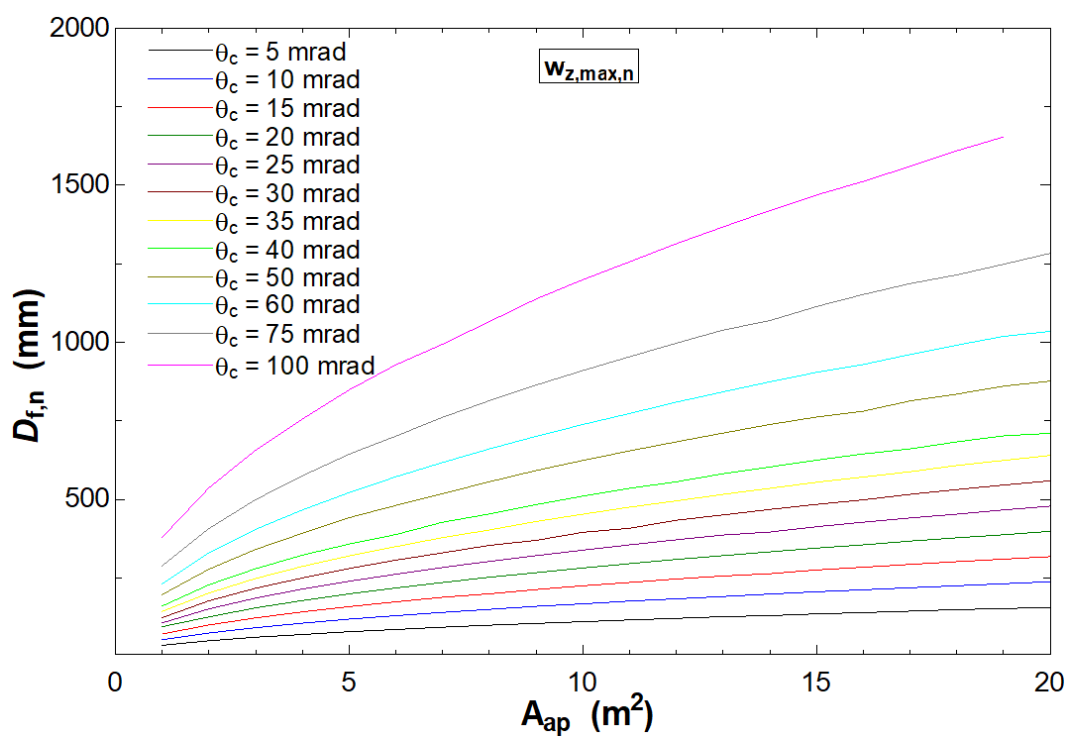


Figura 6.5 – Variação das dimensões máximas da fronteira da imagem em função da área de abertura.

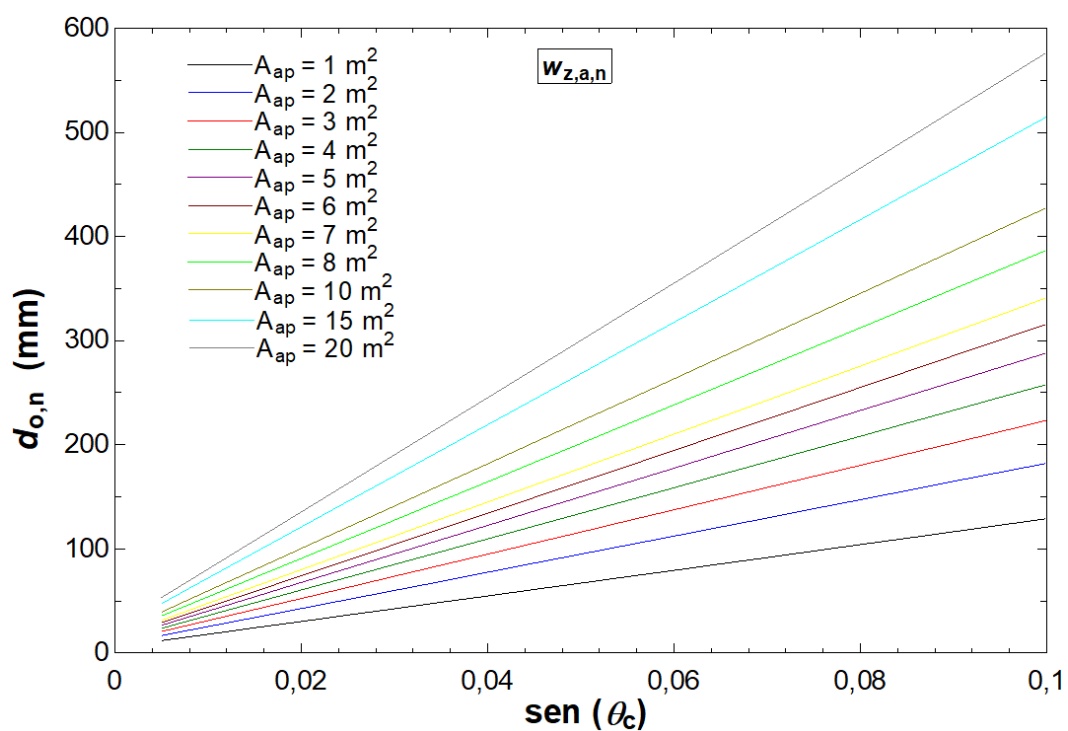


Figura 6.6 – Variação das dimensões máximas do núcleo da imagem em função da abertura do cone de reflexão.

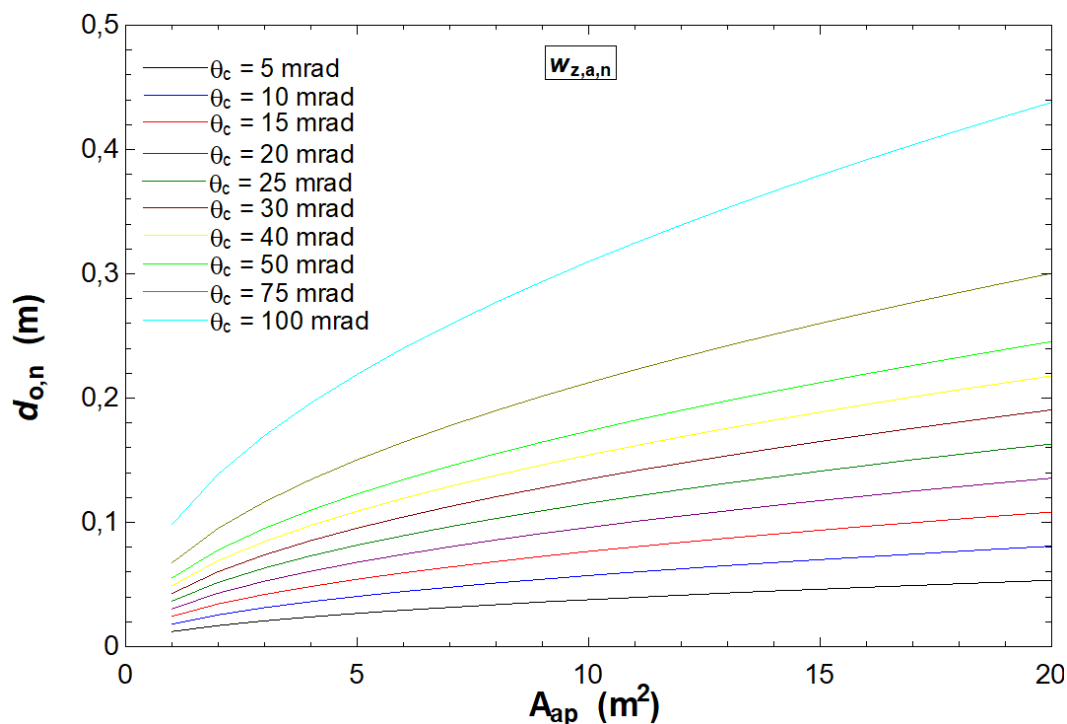


Figura 6.7 – Variação das dimensões máximas do núcleo da imagem em função da abertura da área de abertura.

Em outra simulação, foi verificada a variação de área de abertura do concentrador ao longo do ano. Nessa análise, o ajuste da área de abertura foi feito com $A_{ap} = 1 \text{ m}^2$ no equinócio. Essa simulação foi realizada em duas condições extremas. Na primeira, foi considerado uma flexibilidade ideal do refletor, isto é, os pontos do refletor acompanham perfeitamente a variação da parábola com o sistema de rastreamento sazonal, como feito nas análises de variações dimensionais da imagem acima. Na segunda, foi considerado que o refletor não se deforma e somente varia a inclinação conforme a declinação solar. Portanto, tanto a reta AB, que corta a parábola e forma o eixo maior da elipse do refletor, quanto o eixo menor não se deformam. As variações de A_{ap} estão apresentadas nas Figuras 6.8 e 6.9, respectivamente.

As Figuras 6.8 mostram curvas da variação da área de abertura dos concentradores solares Scheffler Sul (CSS) e Scheffler Norte (CSN) em função da declinação solar (δ). Para CSS, a área de abertura atinge o máximo no Solstício de Câncer, e a mínima no Solstício de Capricórnio, cujos valores são, respectivamente, $1,37 \text{ m}^2$ e $0,62 \text{ m}^2$, na condição da Figura 6.8a, e $1,17 \text{ m}^2$ e $0,79 \text{ m}^2$, na condição da Figura 6.8b. Espera-se que um concentrador real tenha as variações entre essas curvas, pois é dependente da resistência dos materiais e métodos construtivos adotados.

A possibilidade de ser instalado dois concentradores Scheffler (CSS + CSN) para um mesmo receptor, conforme demonstrado na seção 3.1 e pela Figura 2.18 podem amenizar a variação da disponibilidade de energia solar no foco. A linha reta nas Figuras 6.8a e b,

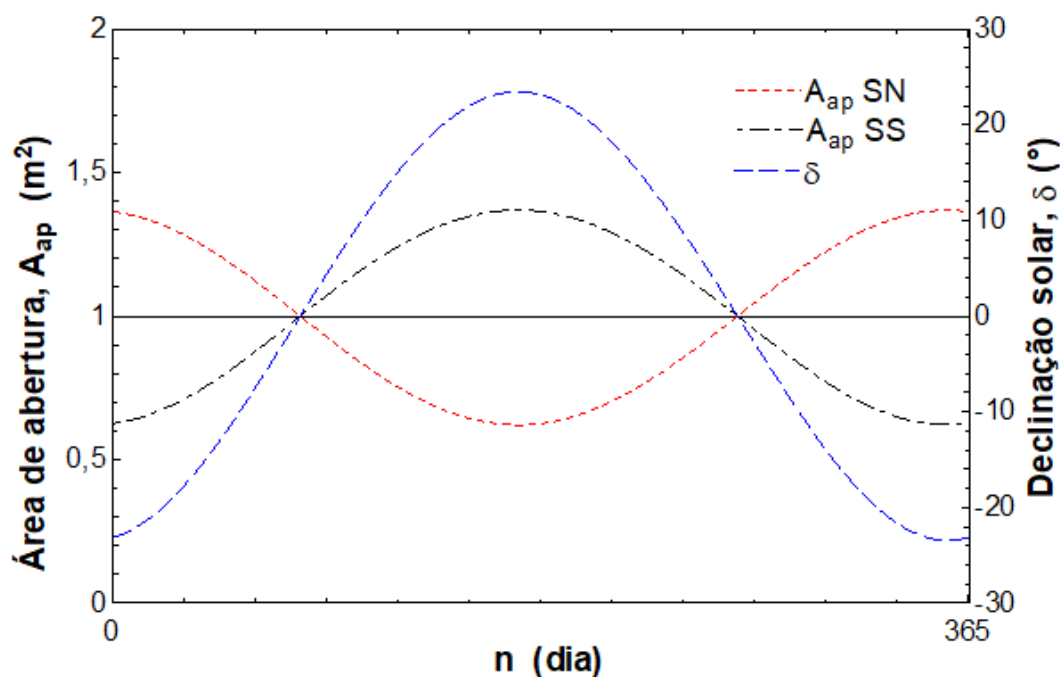


Figura 6.8 – Curvas das variações da área de abertura dos concentradores Scheffler Norte (CSN) e Scheffler Sul (CSS) com deformação ideal da borda da estrutura do refletor.

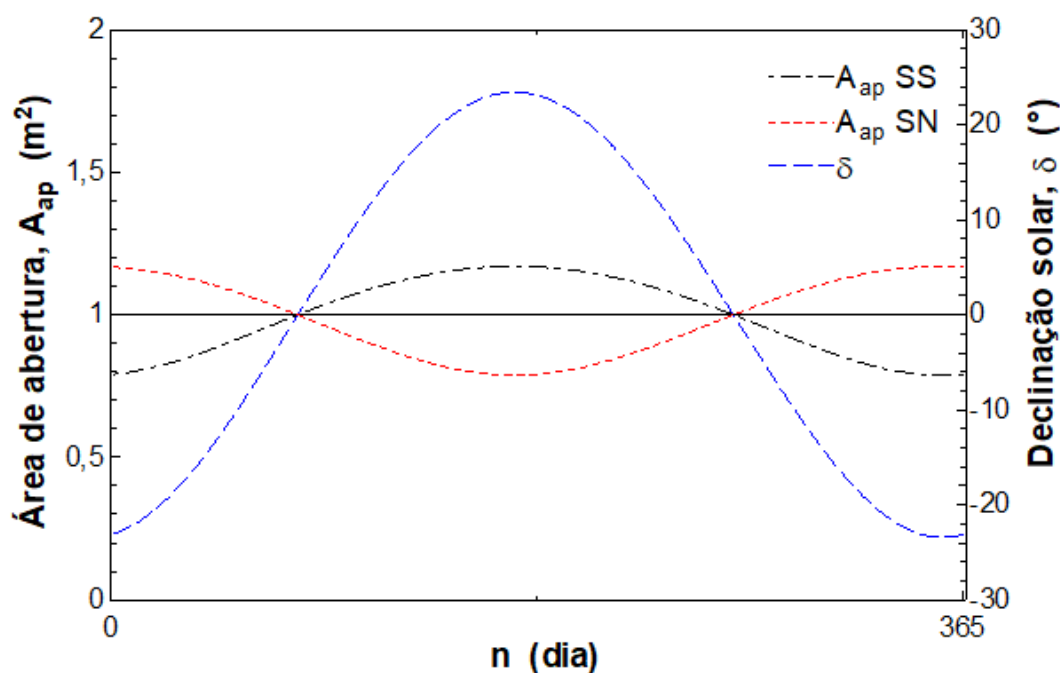


Figura 6.9 – Curvas das variações da área de abertura dos concentradores Scheffler Norte (CSN) e Scheffler Sul (CSS) com estrutura do refletor rígida.

que representa a área de abertura média para tais sistemas, demonstra a estabilidade da quantidade de energia refletida para o foco, embora haja a variação individual de cada concentrador.

A razão de concentração geométrica (C), foi definida como a razão entre a área teórica do concentrador solar, A_{ap} e a área da imagem do foco, A_f , a partir do ponto

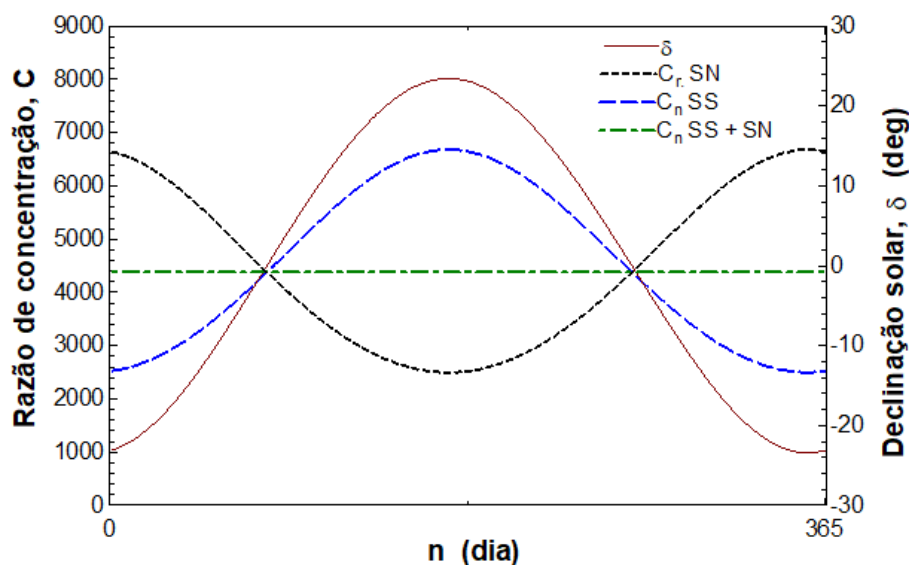


Figura 6.10 – Esquema com dois concentradores Scheffler no mesmo foco na parábola. (DIB; FIORELLI, 2015a; DIB; FIORELLI, 2015b).

B (extremo mais distante do refletor), já que este trabalho não analisa o receptor. As variações verificadas para C foram significativas, conforme ilustra a Figura 6.10. O valor máximo para C foi de 6680 e o mínimo de 2500. Os sistemas CSS+CSN também amenizam a variação da razão de concentração, conforme mostra a linha sólida na Figura 6.10. Com estas variações de C , em um trabalho com receptor, uma análise térmica deve ser elaborada quanto ao fator de interceptação do sistema.

Concentradores reais, com $\theta_c > 0$ têm a mesma intensidade de variações nas áreas de abertura e dimensão da imagem focal. As Figuras 6.11 e 6.12 mostram curvas de variação de razão de concentração geométricas, C , para valores de θ_c entre 0 e 2°.

6.2 VARIAÇÃO SAZONAL DA CURVA TEÓRICA DO FLUXO DE ENERGIA DA IMAGEM

Esta seção apresenta os resultados da simulação para a curva de fluxo de radiação solar concentrada na zona focal do concentrador solar Scheffler Sul (CSS). Para todos os dias simulados, foram considerados um fluxo de radiação direta perpendicular (DNI) de $I_{bT} = 1000 \text{ W/m}^2$, área de abertura teórica, A_{ap} , de 2 m² no equinócio (consideradas as variações da curva da Figura 6.8) e o perfil de emissão de radiação solar no cone ótico incidente conforme as medições de Neumann et al. (2002) (anexo A), como uma função de volume integrada. Foi considerado, também, a abertura do cone ótico devido ao espelho do concentrador, de $\theta_m = 12,5 \text{ mrad}$, para facilitar a definição da abertura do cone ótico devido aos fatores construtivos, dos sistemas de rastreamentos, alinhamento de instalações, etc., do CSS, ou seja, $(\theta_c - \theta_m)$, nas medições discutidas nas seção 6.3.

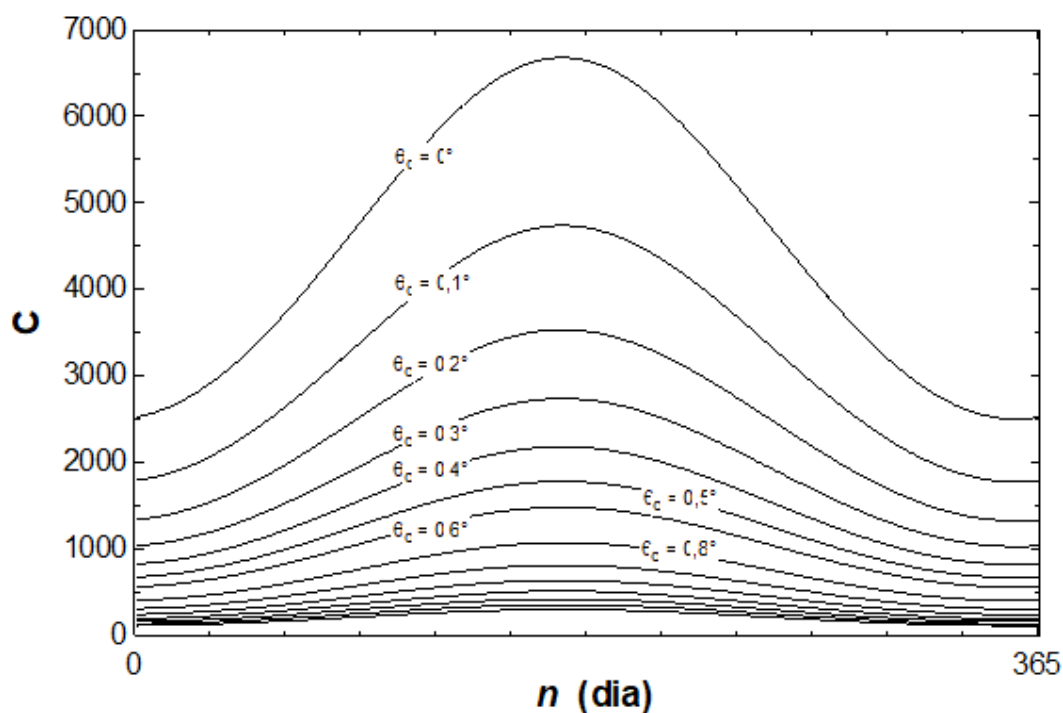


Figura 6.11 – Resultados de simulação da variação da razão de concentração do Scheffler Sul para ângulos de desvios, ou imperfeições, no refletor, que variam de 0° a 2° . (DIB; FIORELLI, 2015b).

As Figuras de 6.13 a 6.15 ilustram as curvas de fluxo (G_f) do CSS para os Equinócios e Solstícios de Câncer e Capricórnio, respectivamente. As curvas para o fluxo sobre os eixo y e z , respectivamente G_y e G_z , obtidas por meio da equação 4.22, estão sobrepostas. Nessas três Figuras, é possível observar duas principais regiões: o núcleo e a fronteira. Esta última, aparece como uma linha quase horizontal ao longo da curva a partir de, aproximadamente, ± 25 mm do centro do foco, até o final, a fronteira da imagem focal, que varia entre as três datas, aproximadamente, entre 115 mm e 150 mm.

As Figuras de 6.13 a 6.15 também mostram as dimensões dos semieixos w_y e w_z , mínimos e máximos, para as curvas G_y e G_z , respectivamente, cujas curvas das respectivas variações foram apresentadas e discutidas na seção 6.1. Os semieixos foram calculados para o dia representado pelas curvas em cada Figura desta seção. O subíndice 1 e 2 indica respectivamente os lados positivos e negativos sobre o plano cartesiano yz .

As Figuras de 6.16 a 6.18 mostram as curvas de fluxo ampliados nos núcleos dos focos das Figuras de 6.13 a 6.15, respectivamente. A evidente diferença entre os volumes de energia vista nestas Figuras são devidos ao mecanismo do sistema de rastreamento sazonal, que varia as dimensões das imagens projetadas refletor devido às variações nas distâncias do refletor, e às variações na área de abertura, mostrada nas Figuras 6.8 *a* e *b*.

Nota-se que as curvas do núcleo no Solstício de Capricórnio apresentam os menores volumes, se integradas, e possuem as bases mais largas em relação à região próxima ao pico do fluxo de energia. Na declinação oposta, o fluxo no Solstício de Câncer possui o

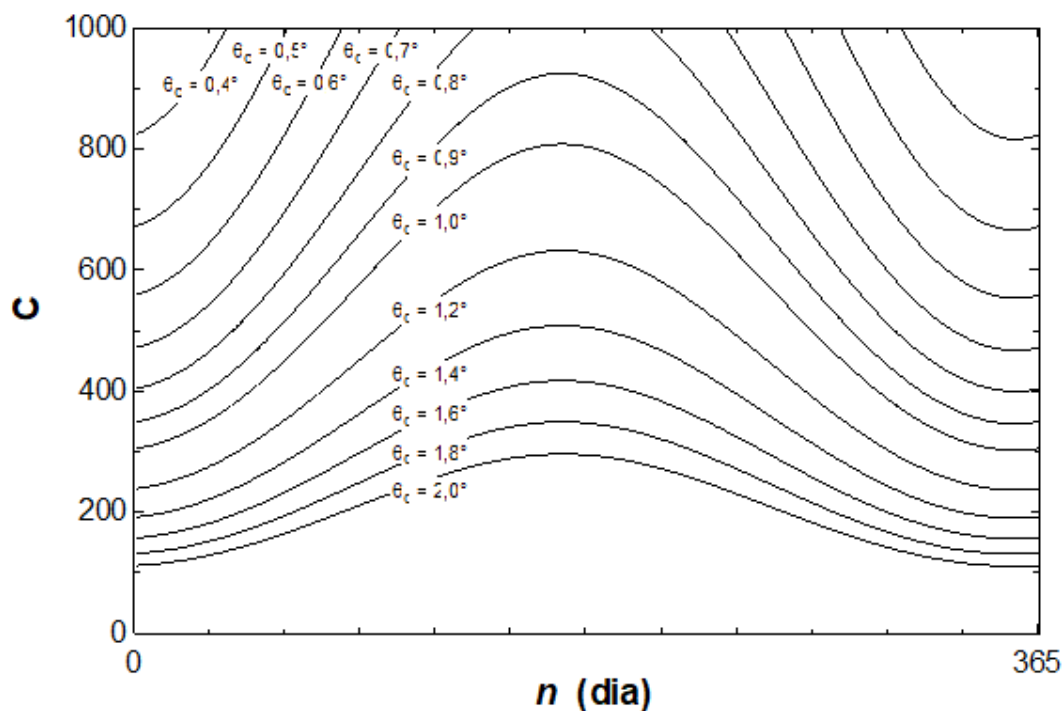


Figura 6.12 – Resultados de simulação da variação da razão de concentração do Scheffler Sul para ângulos de desvios, ou imperfeições, no refletor, que variam de 0° a 2° . (DIB; FIORELLI, 2015b).

maior volume, se as curvas forem integradas, e a base do núcleo mais estreita em relação à região do pico de fluxo, que é a mais larga entre todas as curvas do ano. Nessa mesma curva, é possível verificar uma variação brusca em G_z , na região próxima de $r_f = 14$ mm. Isso ocorre porque nesta declinação, para o CSS, a região do refletor que reflete o cone óptico com menor projeção não é o ponto A, mas uma região linear. Então, na varredura, com a equação 4.22 a partir desse ponto, a influência da diminuição do fluxo sobre r_f é maior que em outras declinações δ . Na região próxima à máxima de G_z , a aparência de degraus é devido ao limite de resolução do EES no processamento da equação 4.22.

As Figuras de 6.16 a 6.18 também elucidam as dimensões dos semieixos apresentados na seção 6.1. Conforme apresentado pela Figura 6.2, os três semieixos mínimos, $w_{z,min}$, $w_{y,min}$ e $w_{y,a}$, estão mais aproximados no Solstício de Capricórnio (Figura 6.18, quando $w_{y,min} = w_{y,a}$, e mais afastados no Solstício de Câncer (Figura 6.17). Devido a resolução das Figuras 6.15 e 6.18, as linhas referentes a estes semieixos aparecem sobrepostas.

O semieixo $w_{z,min}$ apresentou a menor variação ao longo no ano, como mostrado na Figura 6.2. Nas Figuras de 6.13 a 6.18, pode ser visto que $w_{z,min}$ está localizado próximo da região onde o fluxo de energia, na zona focal, aumenta para formar o pico. O semieixo $w_{y,min}$, que possui uma variância maior, teve a dimensão mínima em 15 mm, no Solstício de Capricórnio, e a máxima em 30 mm, no Solstício oposto.

Para analisar as regiões de fronteiras da imagem focal, o eixo das abscissas das Figuras de 6.13 a 6.15 foi truncado e plotado nas Figuras de 6.19 a 6.24. Nestas regiões, o

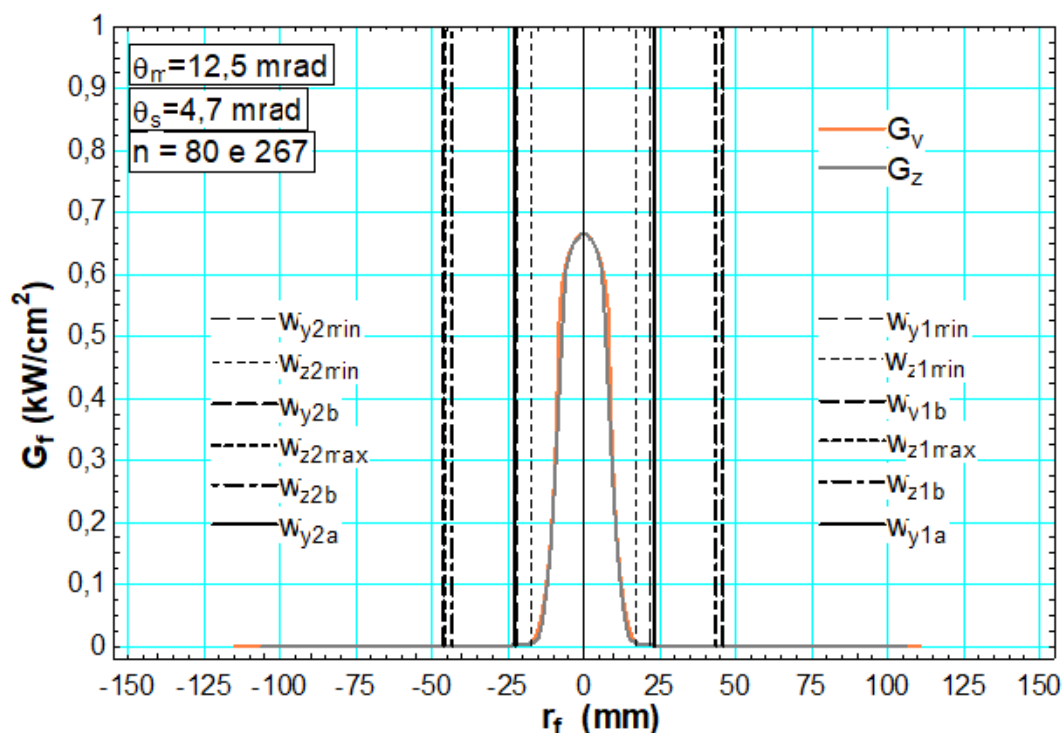


Figura 6.13 – Equinócios, $n=80$ e 267 . Perfil de Sol $4,65$ mrad + auréola = 30 mrad. Marcações para $\theta_s = 4,65$ mrad + $\theta_m = 12,5$ mrad.

fluxo de radiação solar concentrada é 10^{-3} a 10^{-4} W/cm² menor que nas regiões centrais da imagem do foco.

Estas Figuras também ilustram as marcações dos semieixos w_y e w_z máximos, para as curvas G_y e G_z , respectivamente, com variações dimensionais entre as datas em concordância com as curvas mostradas pela Figura 6.1. No Equinócio, as dimensões $w_{y,b}$ e $w_{z,max}$ têm valores aproximados. Este último, em forma inversamente semelhante a $w_{z,min}$, possui a menor variação entre todos os semieixos mostrados pela Figura 6.1.

Cada feixe refletido reproduz, na zona focal, o perfil de emissão do Sol de Neumann et al. (2002). As bordas dos cones óticos compreendem os feixes emitidos pela fronteira do disco solar. Estes feixes são refletidos pelo concentrador para o foco. Os semieixos máximos de w_y e w_z , as vezes $w_{y,a}$, marcam os pontos em onde estes feixes estão incidentes. Nas regiões exteriores a estas marcações, o fluxo é proveniente somente da auréola. Nas partes internas a estes pontos também há fluxo proveniente da auréola solar, para os cones óticos menores, p.e., w_y e w_z mínimos, as vezes $w_{y,a}$. As curvas do fluxo de radiação solar concentrada emitida, principalmente pela auréola, varia conforme o índice de brilho K_T da atmosfera (Anexo A).

O semieixo do cone ótico refletido pelo ponto A, $w_{y,a}$, cuja curva de variação está apresentada na Figura 6.2, aparece entre as dimensões mínimas nas Figura 6.18 e na dimensão máxima nas Figuras 6.21 e 6.22. No Equinócio (Figuras 6.19 e 6.20), w_y e w_z estão próximos, mais que nos Solstícios. No Equinócio é quando a fronteira da auréola

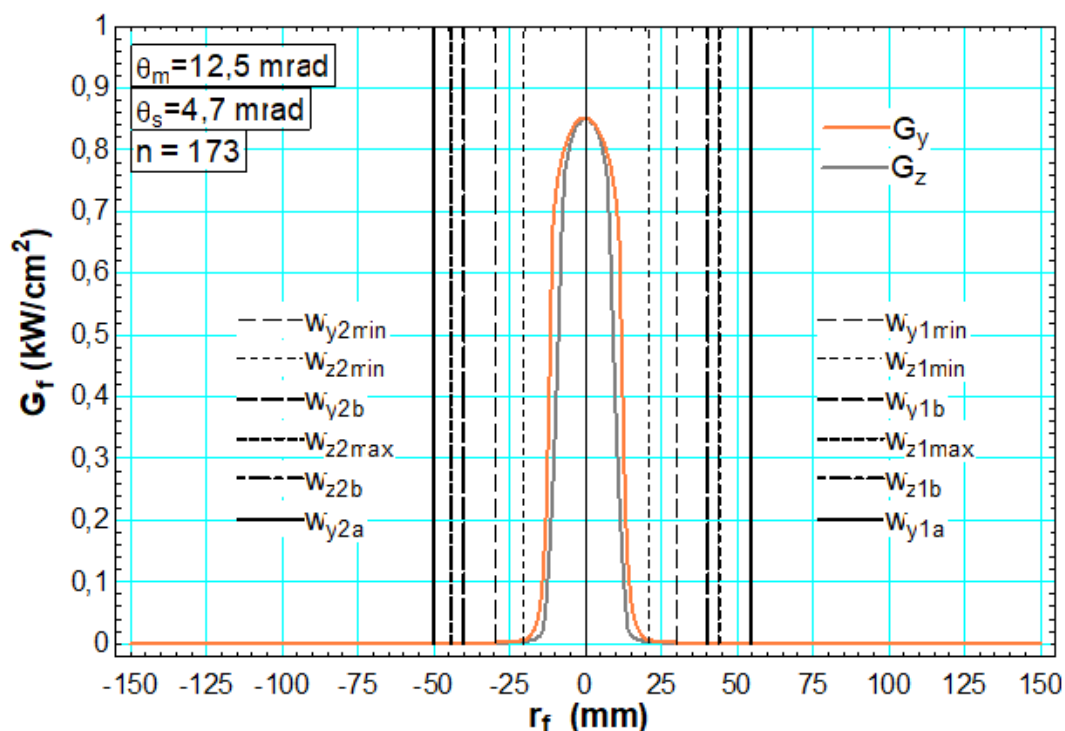


Figura 6.14 – Solstício de Câncer, $n=173$. Perfil de Sol 4,65 mrad + auréola = 30 mrad. Marcações para $\theta_s = 4,65$ mrad + $\theta_m = 12,5$ mrad.

apresenta o menor tamanho.

As Tabelas 6.1 a 6.3 apresentam os valores para todos os semieixos calculados a partir de um cone ótico com abertura do meio ângulo solar, θ_s , mais o meio ângulo do espelho, θ_m (Anexo B). As marcações dos semieixos das Figuras de 6.13 a 6.24 foram traçadas com valores destas Tabelas.

Da mesma forma que as Figuras 6.13 a 6.24 apresentam as curvas G_y e G_z , sobre os eixos y e z , respectivamente, bem como os semieixos w_y e w_z , máximos e mínimos, além de $w_{y,a}$, as Figuras de C.1 a C.30 apresentam as mesmas informações para todos os meses no ano. Os valores para os semieixos também estão nas Tabelas 6.1 a 6.3, calculadas com a mesma abertura de cone ótico acima, $\theta_s + \theta_m = 4,7 + 12,5$ mrad, com o perfil de radiação solar incidente de Neumann et al. (2002).

6.3 AS MEDIÇÕES DA IMAGEM FOCAL

Esta seção apresenta os registros de quatro dias de medições da imagem do foco do concentrador Scheffler Sul e os resultados dos fluxos de energia solar concentrada. Em um projeto de receptor, muito provavelmente, seria considerado uma abertura circular, ao invés de elíptica, para absorção do foco de energia, devido à facilidade e custo de fabricação. Por isso, foi considerado que os valores de cada semieixo como o raio de um círculo que intercepta a imagem focal. Os resultados para o fluxo de energia interceptado, bem como

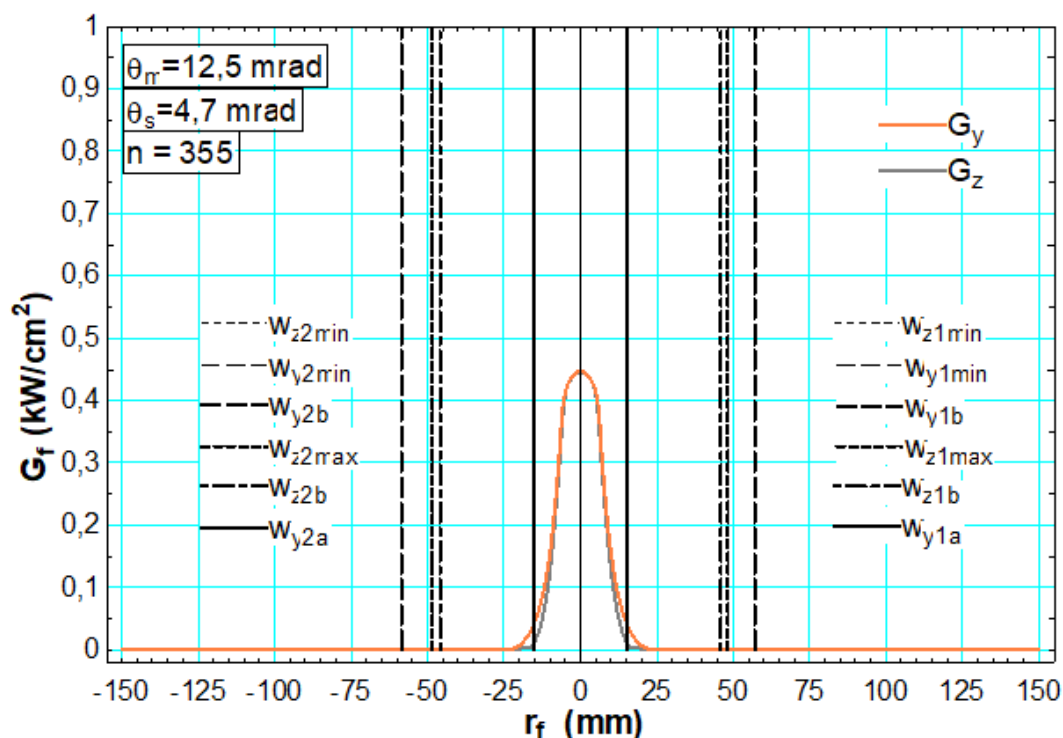


Figura 6.15 – Solstício de Capricórnio, $n=355$. Perfil de Sol $4,65 \text{ mrad} + \text{auréola} = 30 \text{ mrad}$. Marcações para $\theta_s = 4,65 \text{ mrad} + \theta_m = 12,5 \text{ mrad}$.

o fator de interceptação do foco, também são apresentados.

Em cada dia experimental, a câmera CMOS foi posicionada, conforme figura 5.10, e foram medidos os valores da altura da câmera em relação ao solo, e da distância da mesma com as projeções do eixo do sistema de rastreamento diário e do ponto F. Antes do registro das imagens, o filtro com densidade neutra ajustável foi regulado até a densidade máxima, 2,6 OD.

Vários registros em escala de cinza com diferentes velocidades de obturador foram realizados para que a medição fosse realizada na imagem com menor saturação de pixels possível, porém tomando o cuidado de não reduzir demais e com isso aumentar a dificuldade de definição da fronteira, onde os valores de pixels são mais baixos. A nomenclatura dos arquivos foi dada por uma letra e um número. A letra corresponde à ordem do registro da imagem. O número corresponde ao dia experimental.

A figura 6.25 mostra o registro de cada um dos quatro dias experimentais que foram utilizados para realizar o processamento das imagens pelo Matlab, e as medições da imagem focal em 16 bit, ou seja, a faixa de valores da escala de cinza em cada pixel é $2^{16} = 65536$.

As velocidades de obturador da câmera CMOS para registro das imagens Q1, N2, K3 e N4 foram, respectivamente, $10.502 \mu\text{s}$, $13.008 \mu\text{s}$, $697 \mu\text{s}$ e $12.006 \mu\text{s}$. A diferença de tempo de obturação no registro da K3, foi, provavelmente, devido à regulagem do filtro

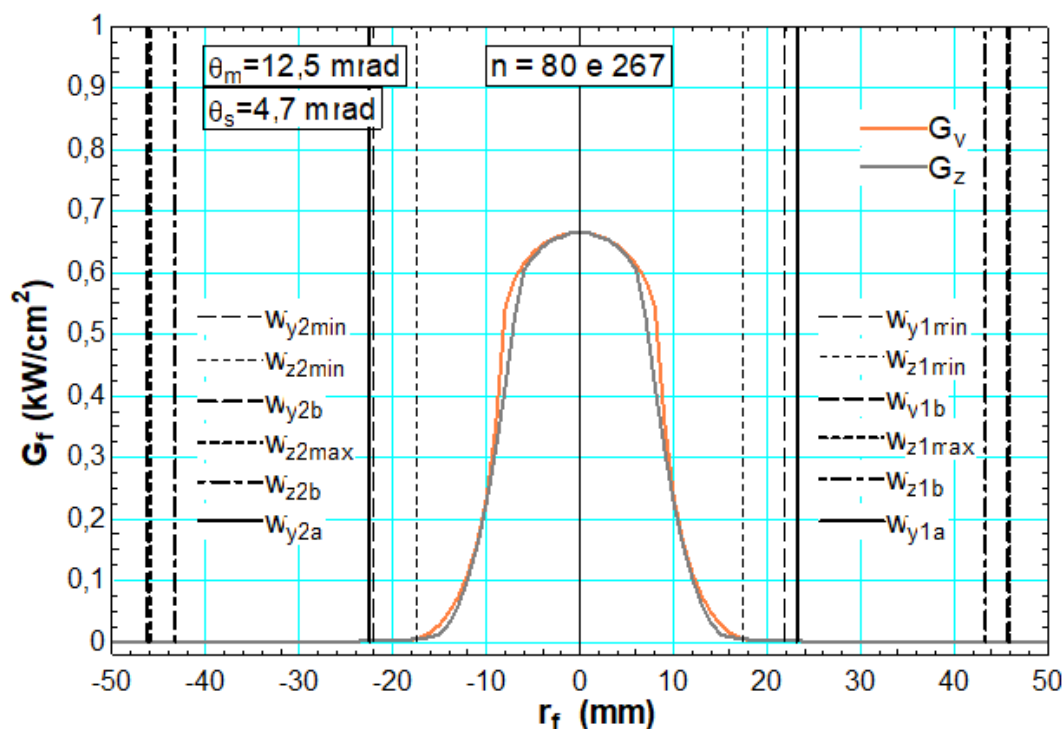


Figura 6.16 – Perfil teórico da imagem nos Equinócios, $n = 80$ ou 267 , com ângulo do cone óptico do espelho de $12,5$ mrad.

ajustável não ter sido para a densidade máxima. Porém, o resultado não foi comprometido, pois houve poucos pixels saturados, de forma similar às outras três imagens.

Sendo as imagens entendidas como uma matriz, cujos elementos são os valores de cinza de cada pixel, o processamento se torna possível pela manipulação matemática dos dados. Para que fosse possível visualizar o conteúdo da imagem, foi realizada uma combinação linear em cada imagem pelo fator 304, valor que apresentou resultados satisfatórios para determinar da fronteira da zona focal. O resultado está apresentado pela figura 6.26. Com o fator da combinação linear próximo de 150 a imagem do foco não apresentaria um contraste satisfatório na fronteira. Com o fator ajustado em 600, a vizinhança teria um realce tão forte quando a imagem focal de tal maneira que a análise não seria possível.

Certamente, a manipulação por combinação linear saturou todos os pixels da imagem focal, exceto alguns na região periférica. Contudo, este processo tornou visível as outras partes da estrutura da bancada experimental, como alvo lambertiano e suporte do alvo.

O comando **entropyfilt** do Matlab foi utilizado depois da combinação linear. Esse comando calcula o valor da entropia em cada pixel com base em uma matriz 9×9 em torno do pixel correspondente. O resultado na figura 6.27 mostra um aumento nas distâncias dos valores de pixels entre diferentes regiões da imagem. Nota-se que este processo diminuiu os valores na região do foco e aumentou os valores no alvo lambertiano.

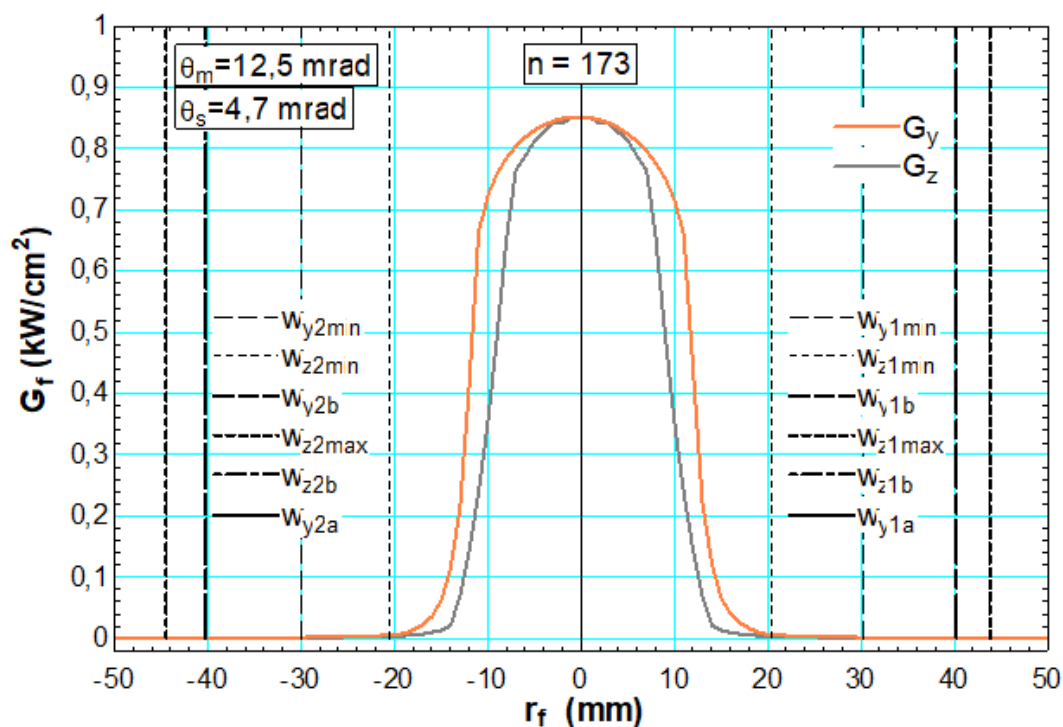


Figura 6.17 – Perfil teórico da imagem no Solstício de Câncer, com ângulo do cone óptico do espelho de 12,5 mrad.

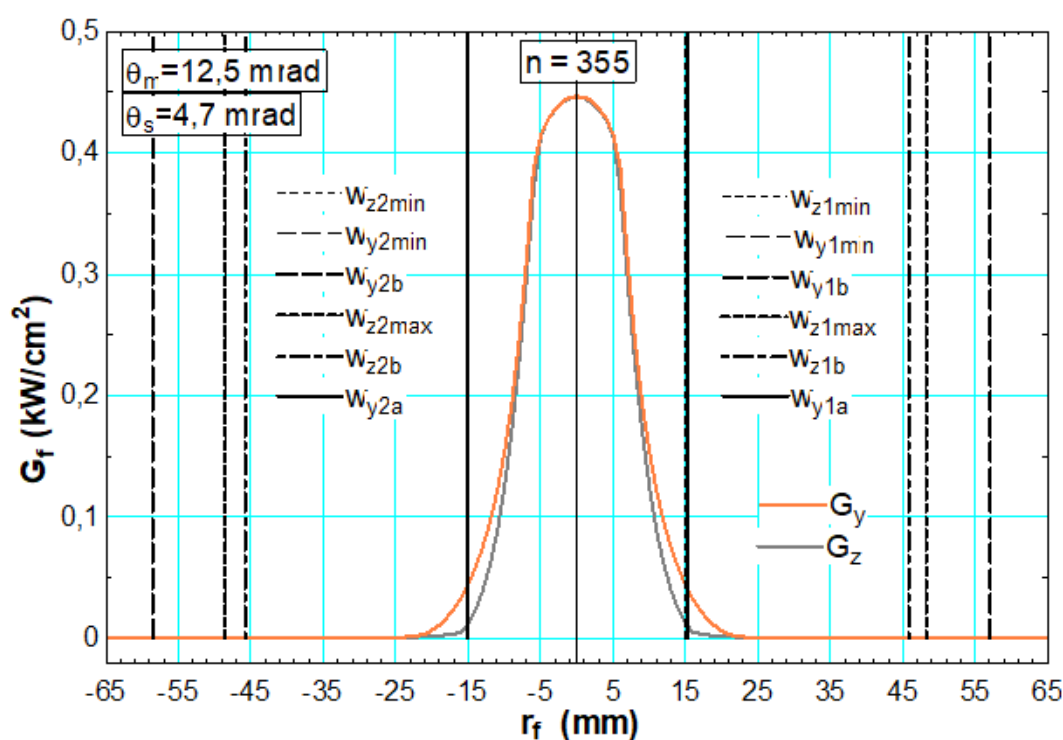


Figura 6.18 – Perfil teórico da imagem no Solstício de Capricórnio, com ângulo do cone óptico do espelho de 12,5 mrad.

O resultado dos valores dos pixels na região do foco das imagens da figura 6.27 deram negativos, enquanto que os do alvo lambertiano deram positivos. A etapa seguinte consistiu na aplicação do comando `imcomplement`, que inverte os valores na ordem da

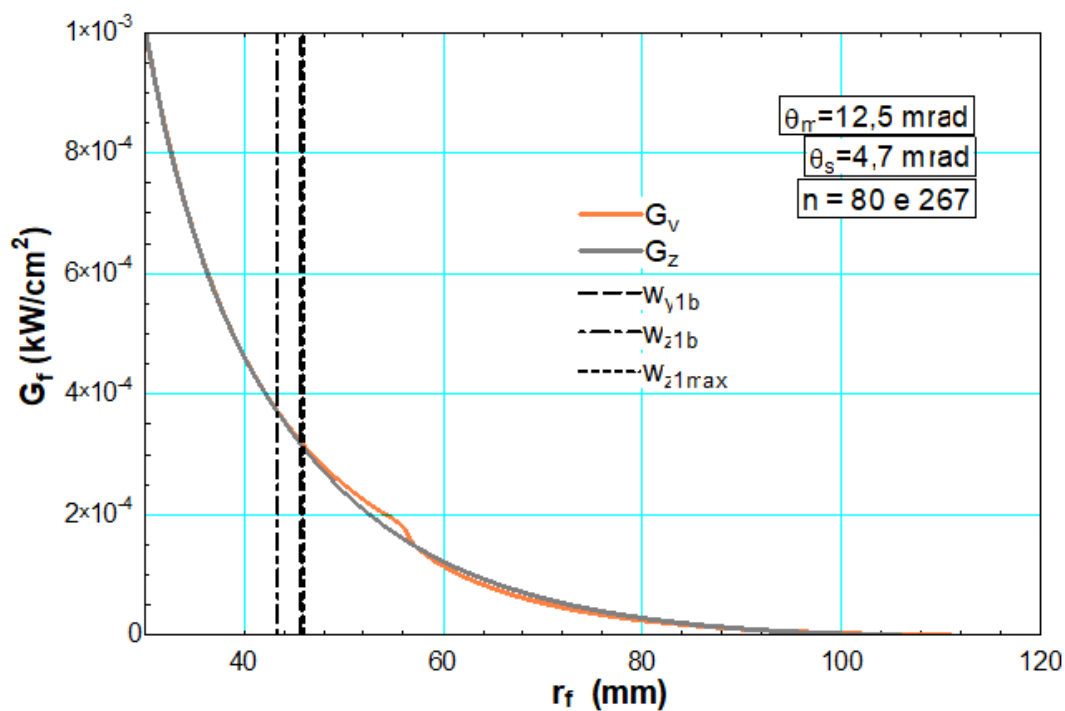


Figura 6.19 – Curva do fluxo de radiação solar concentrada nas regiões laterais (sobre eixo z) e superior (sobre eixo y acima do ponto F) da fronteira do foco nos Equinócios.

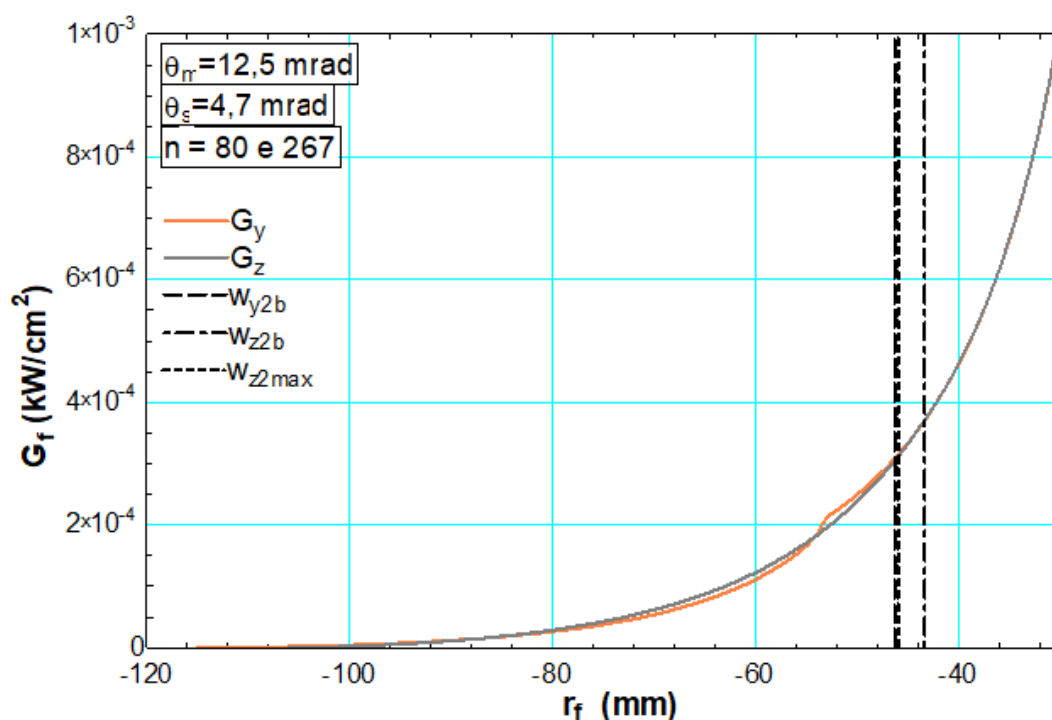


Figura 6.20 – Curva do fluxo de radiação solar concentrada nas regiões laterais (sobre eixo z) e inferior (sobre eixo y abaixo do ponto F) da fronteira do foco nos Equinócios.

escala de cinza da figura, ou seja, o máximo se torna o mínimo e *vice versa*. A lógica se mantém para todos os valores no intervalo da escala. Assim, na área do alvo lambertiano somente os pixels do foco eram positivos.

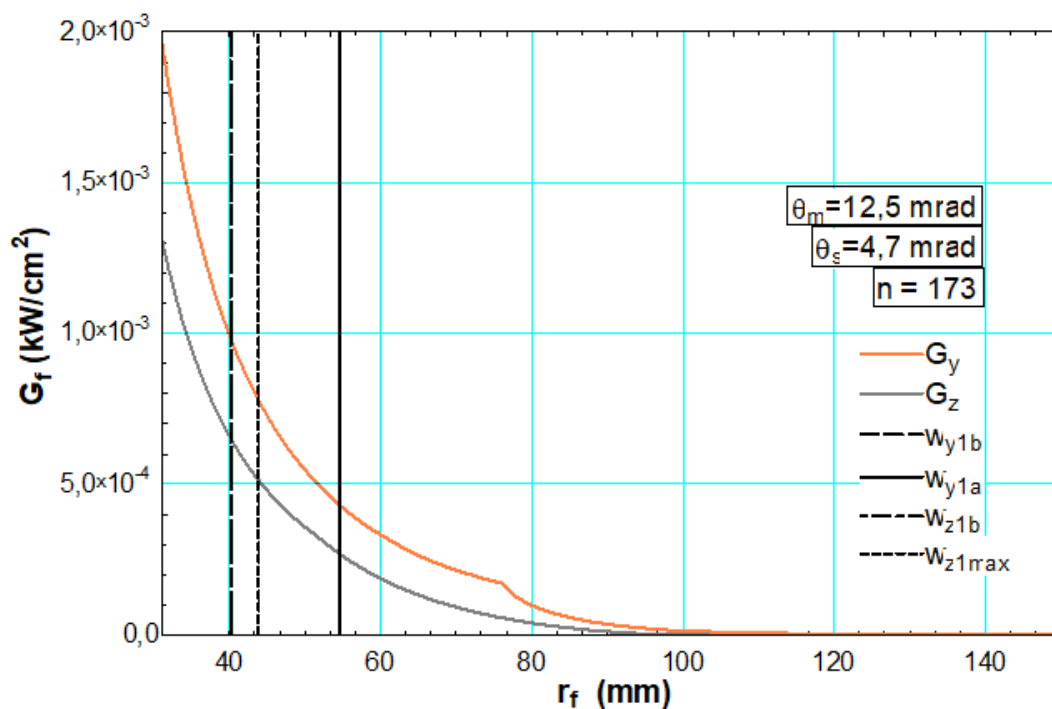


Figura 6.21 – Curva do fluxo de radiação solar concentrada nas regiões laterais (sobre eixo z) e superior (sobre eixo y acima do ponto F) da fronteira do foco no Solstício de Câncer.

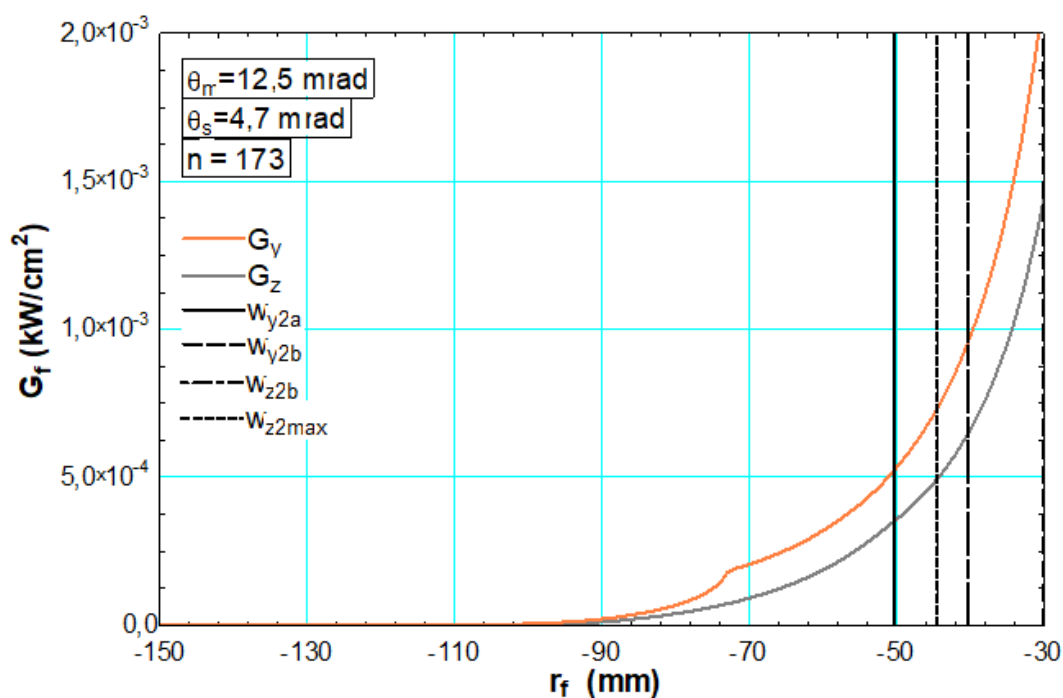


Figura 6.22 – Curva do fluxo de radiação solar concentrada nas regiões laterais (sobre eixo z) e inferior (sobre eixo y abaixo do ponto F) da fronteira do foco no Solstício de Câncer.

Após o procedimento com o comando `imcomplement`, o processamento se seguiu com a discretização binária da imagem para valores de pixel maiores que 0. Ou seja, todos

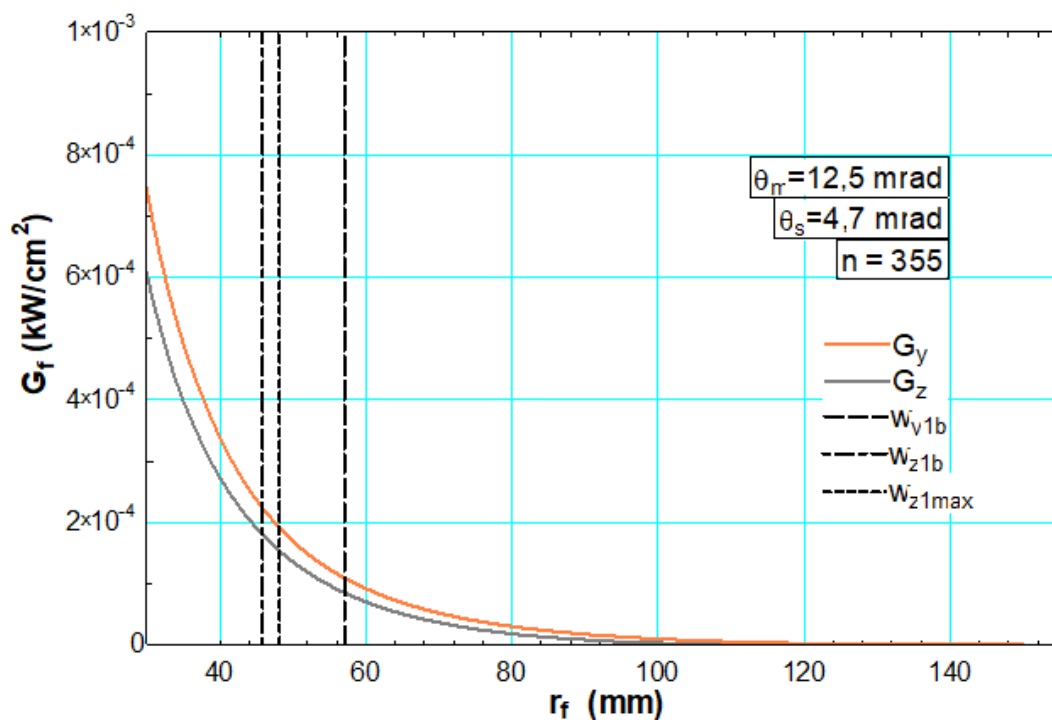


Figura 6.23 – Curva do fluxo de radiação solar concentrada nas regiões laterais (sobre eixo z) e superior (sobre eixo y acima do ponto F) da fronteira do foco no Solstício de Capricórnio.

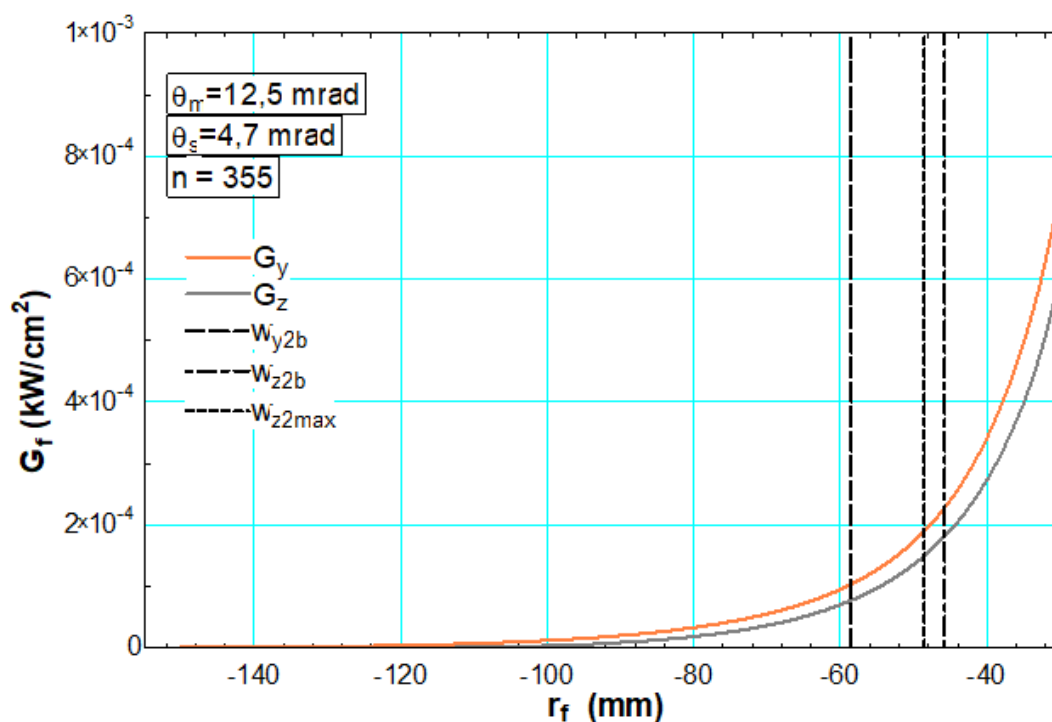


Figura 6.24 – Curva do fluxo de radiação solar concentrada nas regiões laterais (sobre eixo z) e inferior (sobre eixo y abaixo do ponto F) da fronteira do foco no Solstício de Capricórnio.

os pixels com valores positivos tornaram-se 1 enquanto os valores negativos, como o algo lambertiano tornaram-se 0. Com isso, a imagem é convertida de escala de cinza para

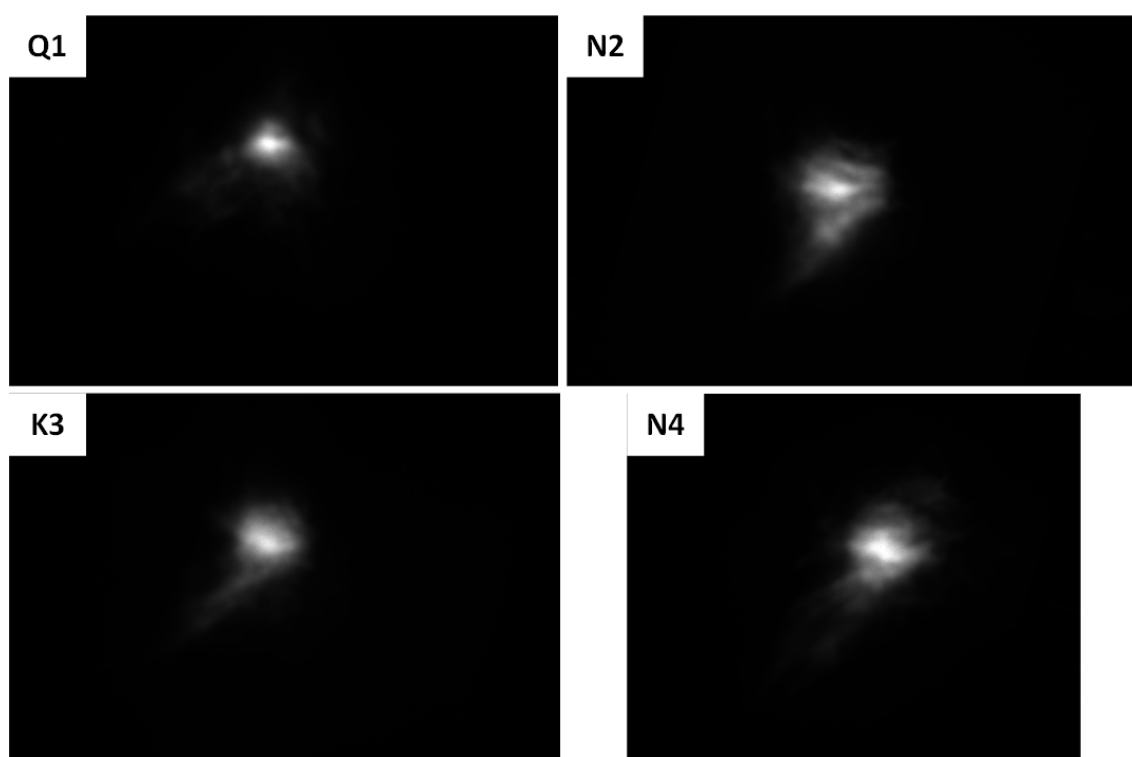


Figura 6.25 – Fotografia original para os quatro dias de medições, Q1 N2 K3 e N4 em 16 bit.

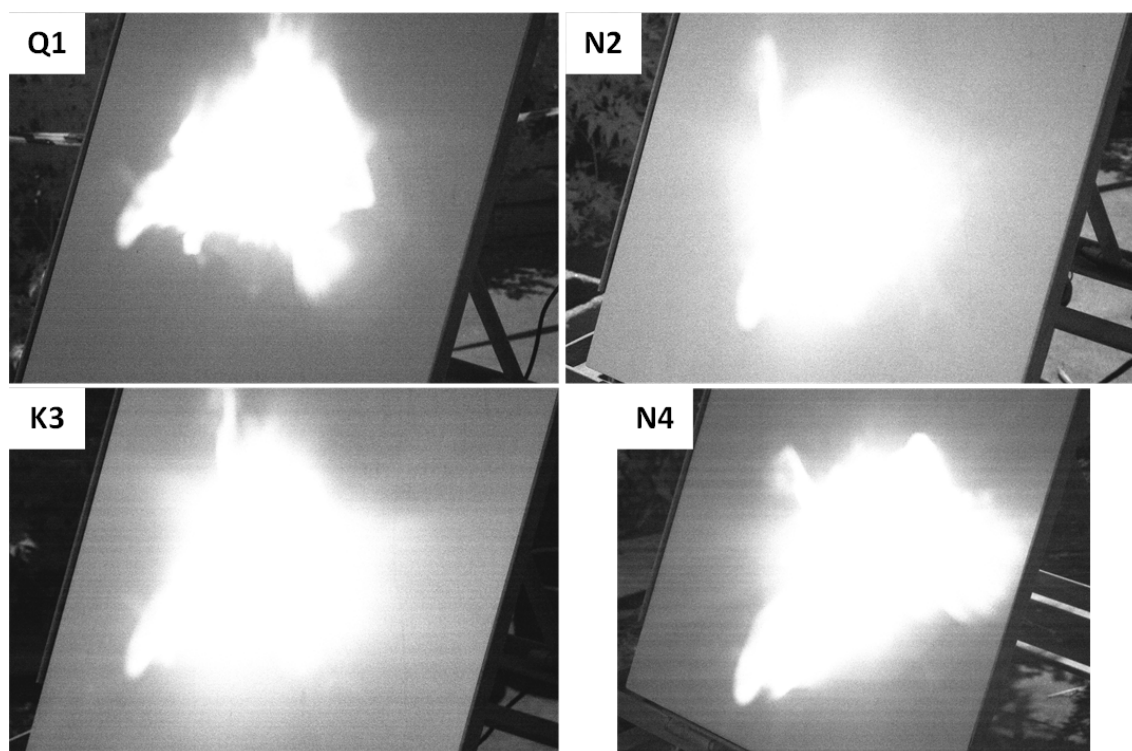


Figura 6.26 – Resultado de combinação linear realizado nos registros originais de cada imagem como matriz dos valores da escala de cinza.

Tabela 6.1 – Valores dos semi eixos (ou raios) das variáveis dimensionais mínimas da imagem focal para o concentrador solar Scheffler Sul (CSS) para $\theta_c = 12,5$ mrad.

Data	n	δ	$w_{y1,min}$	$w_{y2,min}$	$w_{y,min}$	$w_{z1,min}$	$w_{z2,min}$	$w_{z,min}$
17/01	17	-20,9	0,01565	0,01561	0,03126	0,01517	0,01517	0,03034
16/02	47	-12,6	0,01763	0,01755	0,03518	0,01602	0,01602	0,03204
16/03	75	-2,04	0,02130	0,02119	0,04249	0,01721	0,01721	0,03442
21/03	80	-0,07	0,02202	0,02190	0,04392	0,01744	0,01744	0,03489
15/04	105	9,48	0,02544	0,02530	0,05074	0,01863	0,01863	0,03727
15/05	135	18,7	0,02861	0,02845	0,05706	0,01985	0,01985	0,03971
11/06	162	23,0	0,03005	0,02989	0,05994	0,02046	0,02046	0,04092
21/06	172	23,5	0,03018	0,03002	0,06020	0,02052	0,02052	0,04103
17/07	198	21,4	0,02950	0,02934	0,05883	0,02022	0,02022	0,04045
16/08	228	14,0	0,02701	0,02687	0,05388	0,01922	0,01922	0,03845
15/09	258	3,34	0,02325	0,02312	0,04637	0,01786	0,01786	0,03572
21/09	267	-0,14	0,02199	0,02187	0,04386	0,01743	0,01744	0,03488
15/10	288	-8,22	0,01907	0,01896	0,03803	0,01650	0,01650	0,03300
14/11	318	-18,0	0,01624	0,01619	0,03242	0,01546	0,01546	0,03091
10/12	344	-22,8	0,01530	0,01527	0,03057	0,01499	0,01499	0,02997
21/12	355	-23,4	0,01521	0,01518	0,03038	0,01493	0,01493	0,02986

binária, preto e branco.

A seguir, foi realizado uma multiplicação por 0 dos valores fora da área do alvo lambertiano, por meio do comando **roipoly** para tornar todas as regiões de Q1, N2, K3 e N4, pretas, exceto o foco do CSS. O resultado é uma máscara discretizada, mostrada na figura 6.28, ou seja, se multiplicar essa matriz pela matriz original, da figura 6.25, obtém-se uma matriz somente com valores não nulos, na região do foco do concentrador solar.

Como não se utilizou um receptor nesse trabalho, o centro da imagem do foco foi determinado conforme a própria projeção focal. Então, foi realizado uma discretização binária sobre as imagens da figura 6.25, com auxílio do comando **im2bw**, para que os pixels iguais e maiores que um dado valor da escala de 16 bit, fossem unitários, e os valores abaixo deste nível, fossem nulos. O menor valor que melhor se ajustou em todas as figuras foi 17%. A figura 6.29 ilustra um foco consideravelmente menor que aqueles mostrados na figura 6.28.

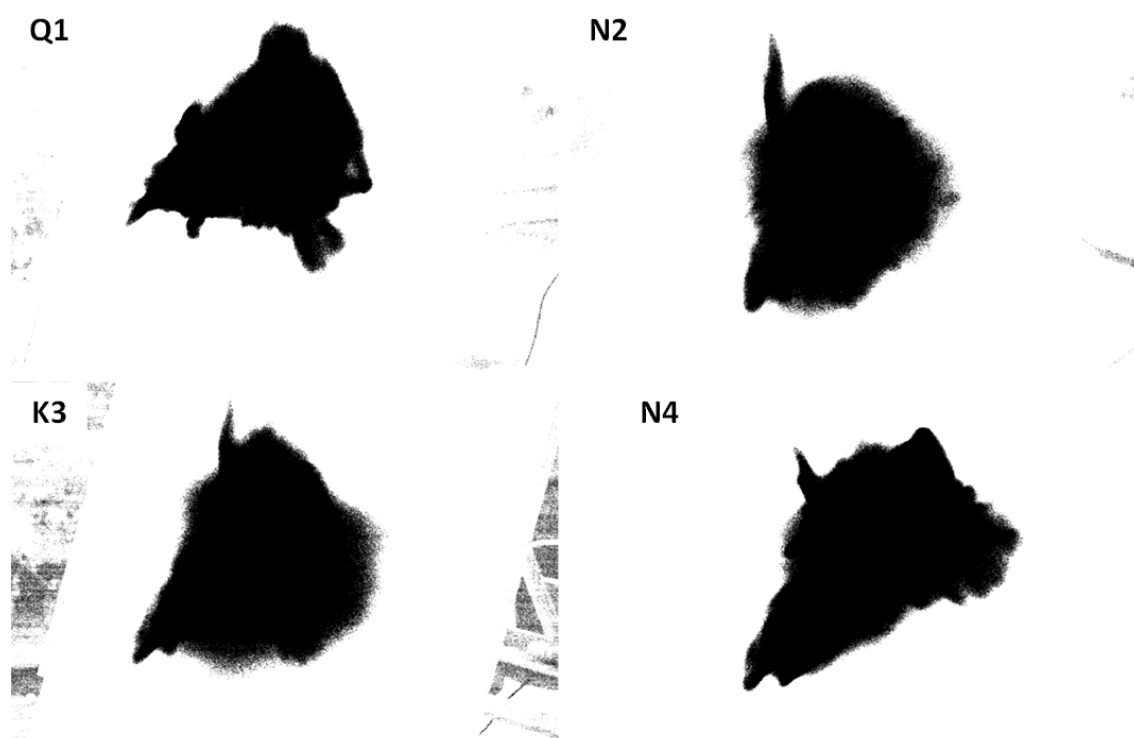


Figura 6.27 – Processamento das imagens com o comando `entropyfilt`.

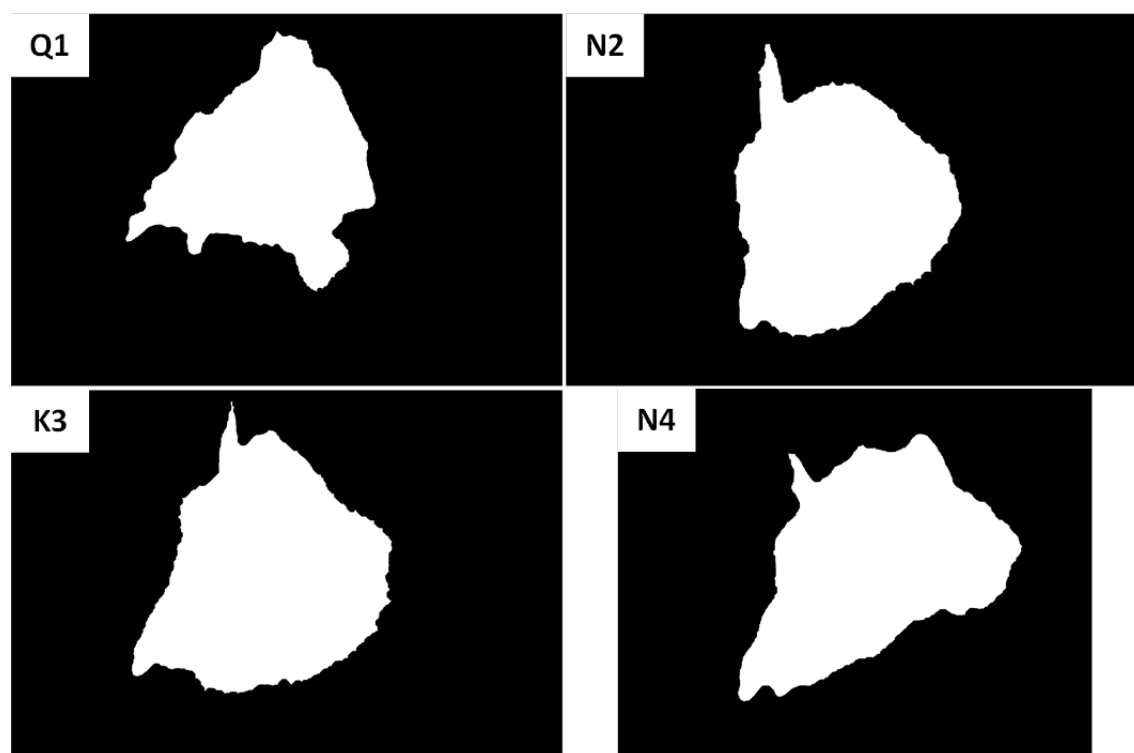


Figura 6.28 – Máscara para isolar cada imagem focal em Q1, N2, K3 e N4.

Tabela 6.2 – Valores dos semi eixos (ou raios) das variáveis dimensionais máximas da imagem focal para o concentrador solar Scheffler Sul (CSS) para $\theta_c = 12,5$ mrad.

Data	n	δ	$w_{y,max}$	$w_{y1,max}$	$w_{y2,max}$	$w_{z,max}$	$w_{z1,max}$	$w_{z2,max}$
17/01	17	-20,9	0,1122 0	0,05542	0,05681	0,09402	0,04681	0,04721
16/02	47	-12,6	0,11370	0,05049	0,05149	0,09520	0,04495	0,04541
16/03	75	-2,04	0,10260	0,04500	0,04563	0,09193	0,04314	0,04366
21/03	80	-0,07	0,09200	0,04571	0,04628	0,09134	0,04541	0,04593
15/04	105	9,48	0,09555	0,04294	0,04326	0,08992	0,04467	0,04525
15/05	135	18,7	0,08857	0,04100	0,04112	0,08856	0,04396	0,04459
11/06	162	23,0	0,08453	0,04029	0,04033	0,08830	0,04383	0,04447
21/06	172	23,5	0,08098	0,04023	0,04026	0,08829	0,04383	0,04446
17/07	198	21,4	0,08117	0,04055	0,04062	0,08837	0,04387	0,04450
16/08	228	14,0	0,08403	0,04191	0,04213	0,08924	0,04432	0,04492
15/09	258	3,34	0,08973	0,04463	0,04510	0,09082	0,04514	0,04568
21/09	267	-0,14	0,09205	0,04574	0,04631	0,09135	0,04541	0,04594
15/10	288	-8,22	0,09845	0,04881	0,04964	0,09378	0,04665	0,04713
14/11	318	-18,0	0,1086	0,05370	0,05494	0,09761	0,04804	0,04846
10/12	344	-22,8	0,1148	0,05668	0,05817	0,09872	0,04818	0,04858
21/12	355	-23,4	0,1157	0,05707	0,05860	0,09704	0,04819	0,04859

Para calcular a centroide, com a função **regionprops** do Matlab, foi necessário realizar uma correção da borda das imagens discretizadas, para que resultasse apenas um "objeto". Foi feito, então, um filtro que calcula o valor para cada pixel para que seja igual a média arredondada (0 ou 1) dos 16 pixels da vizinhança. Os pontos no centro de cada imagem da figura 6.29 é a centroide do foco.

As imagens da figura 6.26 também foram utilizadas para localizar os eixos y e z do foco. As linhas horizontais do suporte do alvo e as bordas laterais do alvo lambertiano foram referência para localizar os pontos de fuga para traçar os eixos z e y , respectivamente. Na figura 6.30, as linhas tracejadas, em lilás, são as linhas de referência, e as linhas verdes, traço pontilhadas, são os eixos, que cruzam as respectivas centroides.

Como dito anteriormente, os valores dos semieixos foram utilizados como raios de um círculo que intercepta a parte de interesse da imagem focal. Uma matriz com valores binários foi feita para cada diâmetro de interceptação da imagem do foco e utilizadas como

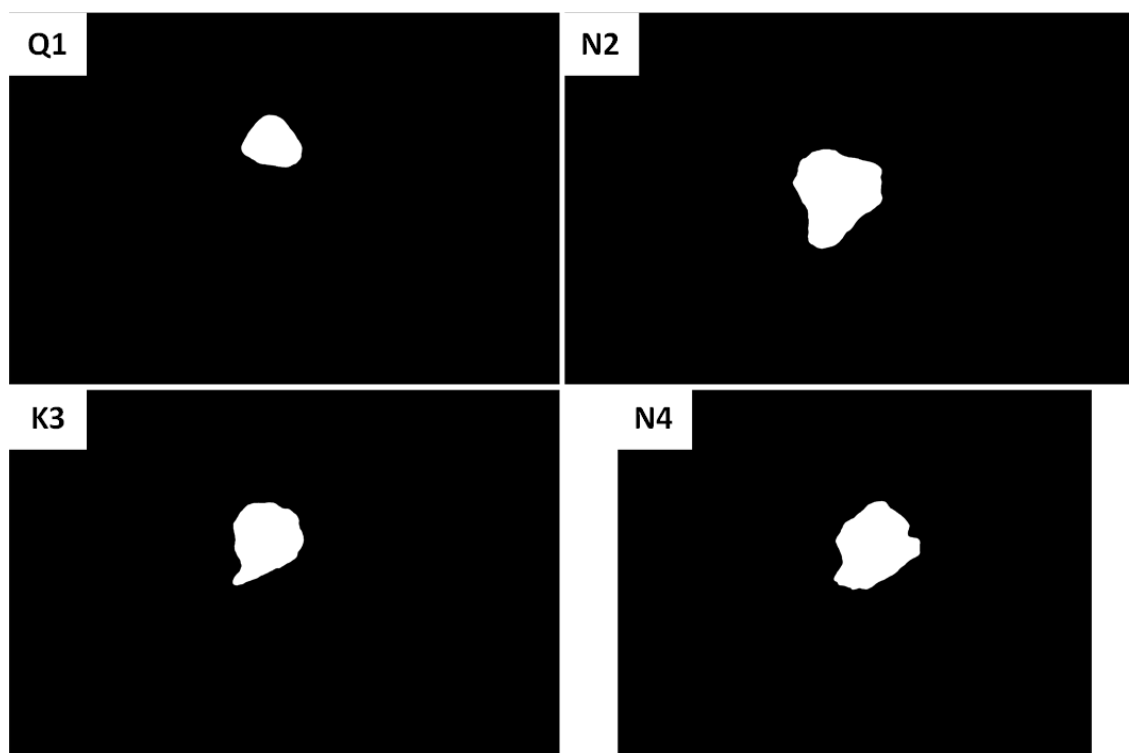


Figura 6.29 – Discretizações binárias para determinar o centroide de cada imagem focal

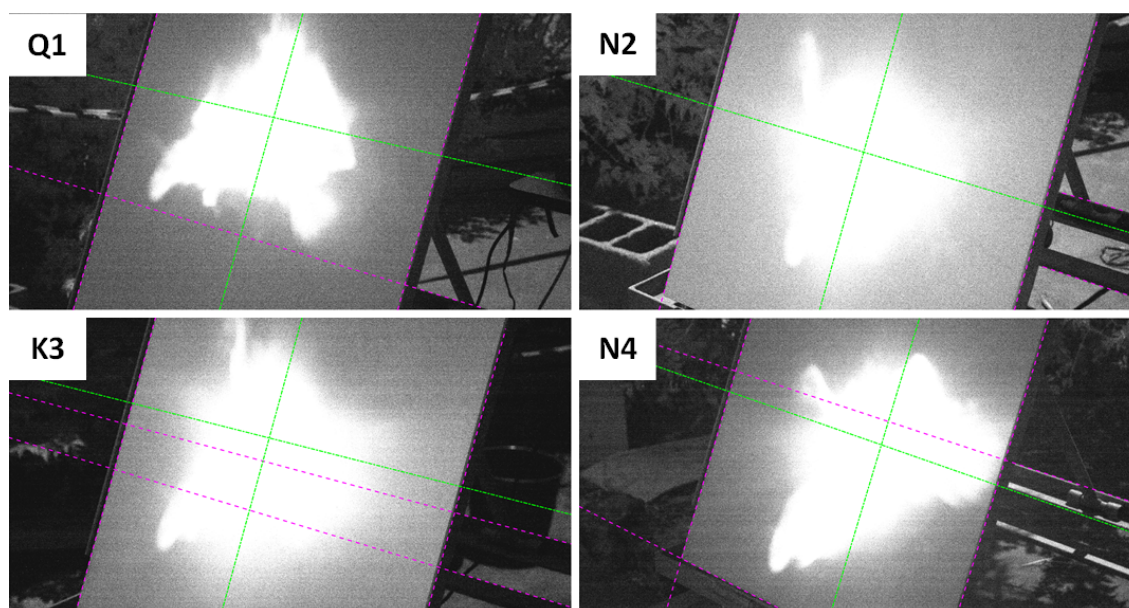


Figura 6.30 – Linhas de referência para encontrar o ponto de fuga, tracejadas em lilás, e linhas dos eixos da imagem focal, traço pontilhadas em verde.

Tabela 6.3 – Valores dos semi eixos (ou raios) das variáveis dimensionais do feixe refletido no ponto A da imagem focal para o concentrador solar Scheffler Sul (CSS) para $\theta_c = 12,5$ mrad.

Data	n	δ	w_{y1a}	w_{y2a}	w_{ya}
17/01	17	-20,9	0,01575	0,01561	0,03136
16/02	47	-12,6	0,01784	0,01755	0,03539
16/03	75	-2,04	0,02213	0,02155	0,04368
21/03	80	-0,07	0,02322	0,02255	0,04577
15/04	105	9,48	0,03053	0,02924	0,05977
15/05	135	18,7	0,04326	0,04057	0,08383
11/06	162	23,0	0,05332	0,04927	0,10259
21/06	172	23,5	0,05450	0,05027	0,10477
17/07	198	21,4	0,04896	0,04552	0,09448
16/08	228	14,0	0,03576	0,03394	0,06970
15/09	258	3,34	0,02540	0,02456	0,04996
24/09	267	-0,14	0,02318	0,02251	0,04569
15/10	288	-8,22	0,01935	0,01896	0,03831
14/11	318	-18,0	0,01637	0,01619	0,03256
10/12	344	-22,8	0,01539	0,01527	0,03066
21/12	355	-23,4	0,01528	0,01518	0,03046

máscaras para as imagens da figura 6.25, via multiplicação de matrizes.

Os eixos mostrados pela figura 6.30 foram referências para a localização da centroide das elipses das máscaras, exceto daquela ilustrada pela figura 6.31, que apresenta uma fusão das figuras 6.28 e 6.26. A superfície da figura 6.31 representa o fluxo total da energia na zona focal em função dos eixos F_y e F_z .

Os valores dos semieixos das elipses das máscaras são uma função de θ_c , que é calculado de modo iterativo sobre as imagens. O valor dos desvios do refletor que melhor se ajustou em todas as imagens focais foi de $\theta_b = 35$ mrad (os desvios devido a construção do refletor). Este valor está em concordância com as figuras 6.4 e 6.7. Somado com o ângulo ótico devido ao espelho $\theta_m = 12,5$ mrad, o valor do ângulo do cone ótico θ_c do CCS resulta em 47,5 mrad. A tabela 6.4 apresenta todos os valores para semieixos para ângulo do cone de reflexão ($\theta_c + \theta_s = 47,5 + 4,7 = 52,2$ mrad) para os respectivos dias.

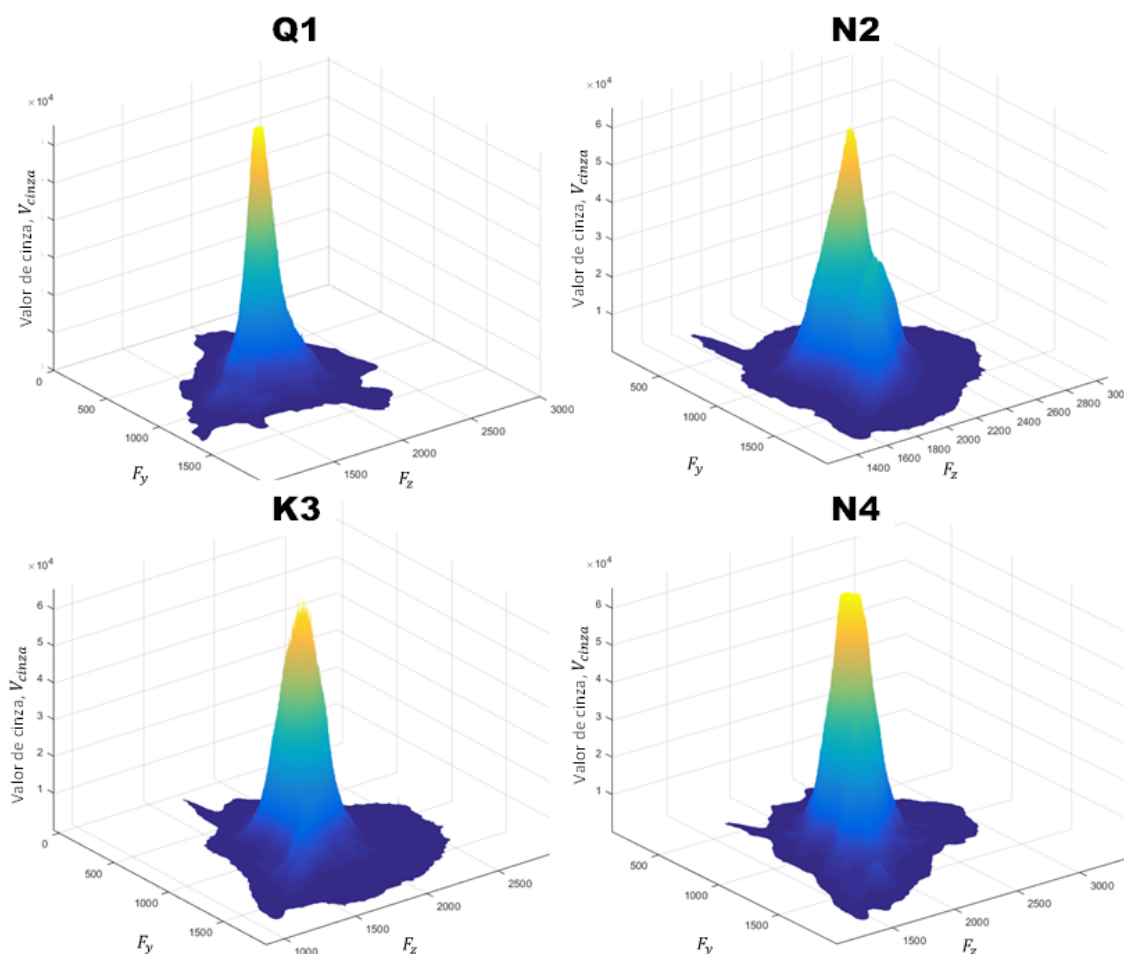


Figura 6.31 – Superfície do fluxo de energia em todo o foco do concentrador solar Scheffler nas respectivas datas após da aplicação da máscara para eliminar informações da vizinhança.

As figuras de 6.32 a 6.35 ilustram superfícies do fluxo de energia na zona focal, que são resultado da multiplicação de matrizes entre as imagens da figura 6.25 e as máscaras com diferentes diâmetros de interceptação. Os raios dessas máscaras são as médias entre os respectivos semieixos, ou seja, na figura 6.32, o raio foi a média entre $w_{y1,min}$ e $w_{y2,min}$, na figura 6.33, entre $w_{z1,min}$ e $w_{z2,min}$, e assim sucessivamente.

Para o cálculo da energia disponível em cada diâmetro de interceptação, primeiro, foi necessário realizar o cálculo da área real e da quantidade de radiação solar refletida para a zona focal. Em função da forma como o refletor foi construído, havia pequenos espaços entre os espelhos do refletor, a área ocupada pela barra central da elipse, e alguns espaços entre os espelhos e a borda onde dificilmente o espelho estaria corretamente posicionado. A medição destes espaços foi de $A_e = 0,013 \pm 0,001 \text{ m}^2$, que resultou num coeficiente de área $\zeta = 0,995 \pm 0,001$. Isso resulta que no equinócio, por exemplo, a área de abertura teórica $A_{ap} = 2 \text{ m}^2$ para o concentrador solar construído neste trabalho, equivale a área real de $A_a = 1,991 \pm 0,001 \text{ m}^2$.

Tabela 6.4 – Dimensões dos semieixos para as quatro imagens com $\theta_c = 47,5$ mrad e incertezas (em mm).

Semieixo	N2	$\delta_{aca,N2}$	K3	$\delta_{aca,K3}$	N4	$\delta_{aca,N4}$	Q1	$\delta_{aca,Q1}$
$w_{y,a}$	93,40	$\pm 3,42$	98,29	$\pm 3,42$	177,9	$\pm 3,54$	93,22	$\pm 3,42$
$w_{y1,a}$	47,25	$\pm 1,73$	49,97	$\pm 1,74$	94,59	$\pm 1,88$	47,15	$\pm 1,73$
$w_{y2,a}$	46,15	$\pm 1,69$	48,32	$\pm 1,68$	83,28	$\pm 1,66$	46,08	$\pm 1,69$
$w_{y,max}$	347,3	$\pm 3,97$	331,3	$\pm 3,92$	252,8	$\pm 3,70$	348,0	$\pm 3,97$
$w_{y1,max}$	166,8	$\pm 1,91$	169,5	$\pm 2,01$	163,0	$\pm 2,39$	167,2	$\pm 1,91$
$w_{y2,max}$	180,5	$\pm 2,06$	171,4	$\pm 2,03$	127,9	$\pm 1,87$	180,9	$\pm 2,06$
$w_{z,max}$	285,8	$\pm 3,86$	284,4	$\pm 3,86$	273,3	$\pm 3,86$	293,5	$\pm 3,86$
$w_{z1,max}$	141,1	$\pm 1,91$	140,3	$\pm 1,90$	134,0	$\pm 1,89$	149,3	$\pm 1,95$
$w_{z2,max}$	144,8	$\pm 1,96$	144,2	$\pm 1,96$	139,3	$\pm 1,97$	148,6	$\pm 1,94$
$w_{y,min}$	92,38	$\pm 3,42$	96,76	$\pm 3,42$	149,2	$\pm 3,49$	92,23	$\pm 3,42$
$w_{y1,min}$	46,23	$\pm 1,71$	48,44	$\pm 1,71$	74,80	$\pm 1,75$	46,15	$\pm 1,71$
$w_{y2,min}$	46,15	$\pm 1,71$	48,32	$\pm 1,71$	74,41	$\pm 1,74$	46,08	$\pm 1,71$
$w_{z,min}$	91,18	$\pm 3,42$	93,58	$\pm 3,81$	112,6	$\pm 3,82$	91,27	$\pm 3,81$
$w_{z1,min}$	45,53	$\pm 1,71$	46,74	$\pm 1,90$	56,20	$\pm 1,90$	45,51	$\pm 1,90$
$w_{z2,min}$	45,64	$\pm 1,71$	46,85	$\pm 1,91$	56,45	$\pm 1,91$	45,76	$\pm 1,91$

No cálculo da energia disponível na zona focal, duas hipóteses para condição de contorno da variação da área de abertura do refletor foram consideradas. A primeira condição de contorno é que a deformação ocorre perfeitamente, de tal maneira que o refletor permanece posicionado sobre a parabolóide teórica conforme o sistema de rastreamento sazonal é acionado. A segunda condição de contorno é que a resistência dos materiais do refletor impede qualquer alteração dimensional na borda do refletor, mesmo que haja alguma deformação na superfície dos espelhos, o que implica que a área de abertura é alterada pela mudança na inclinação do refletor quando o sistema de rastreamento é acionado. As curvas dessas variações de A_{ap} foram expostas pelas figuras 6.8 e 6.9, referenciadas a partir daqui como curva *a* e curva *b*, respectivamente. Por isso, a tabela 6.5 apresenta dois valores de A_a , na forma de valor conforme a curva *a*/curva *b*.

A tabela 6.5 também apresenta o horário solar e ângulo horário no instante de cada registro da imagem, bem como a velocidade do obturador da câmera CMOS. Os dados de radiação solar direta perpendicular, $G_{b,T}$, foram medidos pelo pireliômetro, com

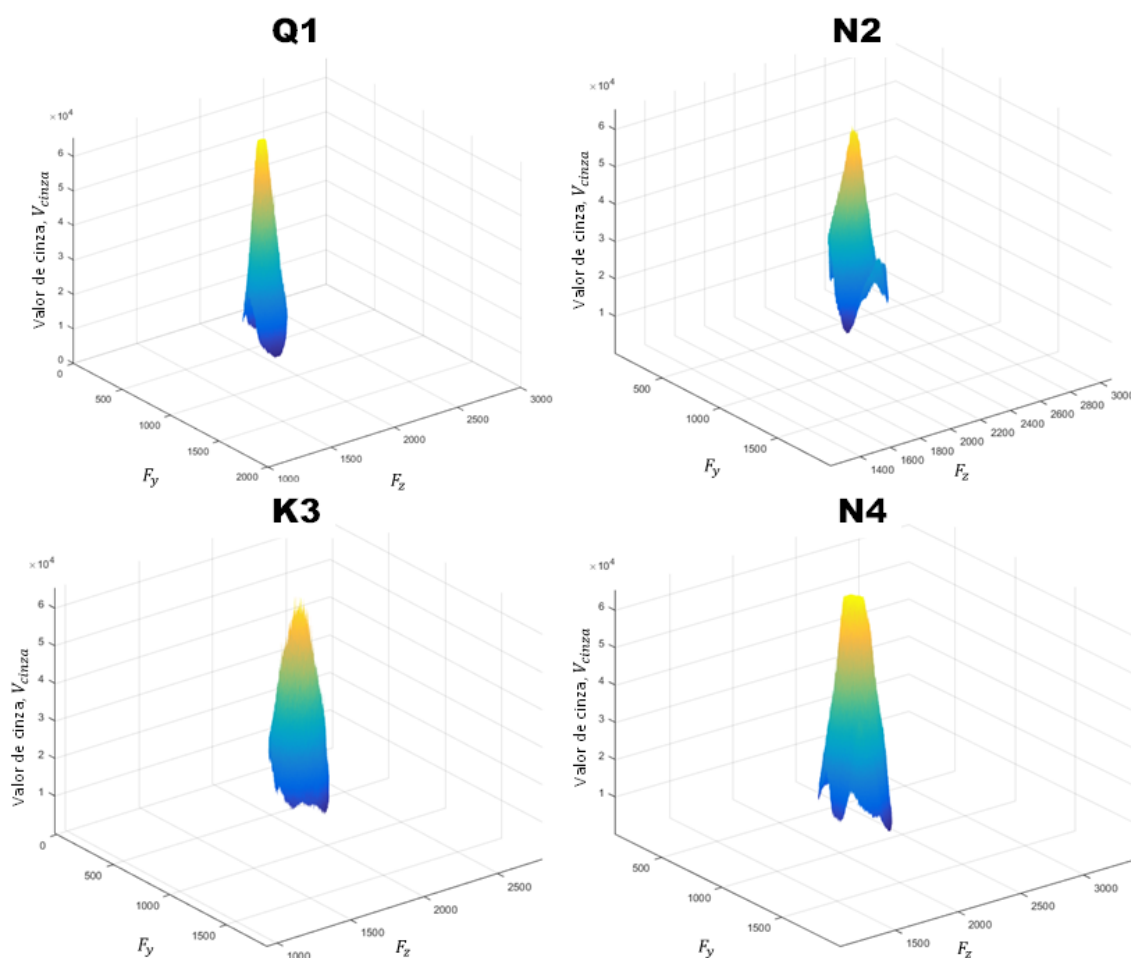


Figura 6.32 – Superfície do fluxo de energia no núcleo do foco após aplicação das máscaras com diâmetro de $w_{y,min}$, com $\theta_c = 47,5$ mrad.

Tabela 6.5 – Parâmetros de referência de cálculo e posicionamento para cada registro de imagem.

Imagem	Hora solar (h:min)	Ângulo horário	Velocidade de obturador (μs)	$A_{ap}(m^2)$	$G_{b,T}(W/m^2)$	$G_f(W)$
Q1	12:01	$0,25^\circ$	10.502	1,266/1,591	996 ± 5	$1255/1577 \pm 3,94\%$
N2	12:28	$7,00^\circ$	13.008	1,275/1,597	783 ± 4	$993/1244 \pm 3,94\%$
K3	12:06	$1,5^\circ$	697	1,404/1,676	847 ± 4	$1184/1413 \pm 3,96\%$
N4	13:10	$17,50^\circ$	12.006	2,291/2,140	832 ± 4	$1897/1772 \pm 3,96\%$

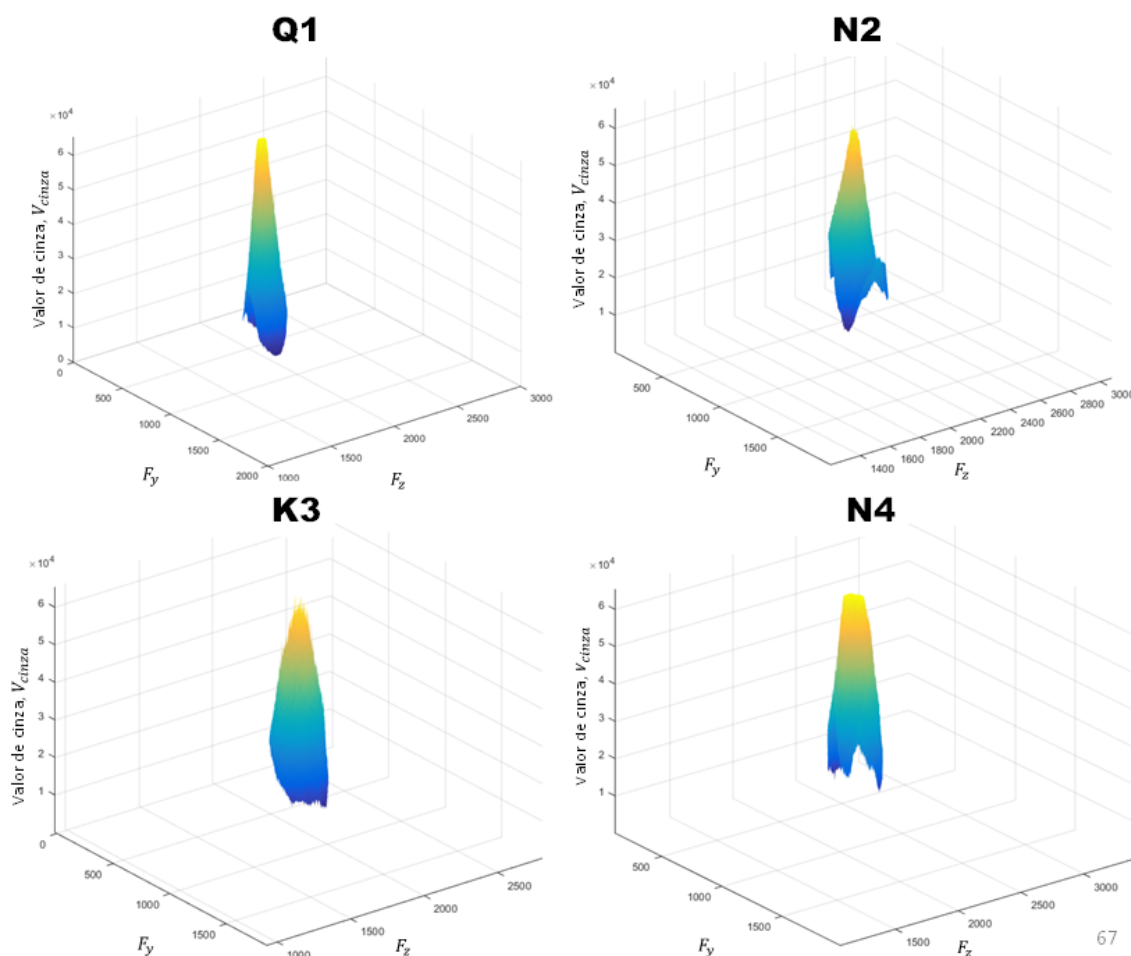


Figura 6.33 – Superfície do fluxo de energia no núcleo do foco após aplicação das máscaras com diâmetro de $w_{z,min}$, com $\theta_c = 47,5$ mrad.

incerteza de 1%, conforme descrito na seção 5.2.4. O cálculo da quantidade total do fluxo de energia na zona focal foi feito pela expressão $G_f = A_a \times G_{b,T}$ para cada valor de A_a , no formato de maior/menor variação sazonal.

As tabelas 6.6 e 6.7 apresentam os resultados das medições de fluxo de energia, $G_{f,\gamma}$, para cada fator de interceptação, γ , calculados via simulação em Matlab, para os fluxos de energia solar concentrada em cada diâmetro de abertura na zona focal, representados pelas figuras de 6.31 a 6.35. Essas tabelas também mostram o pico do fluxo de energia, $g_{f,max}$, nas imagens de Q1 a N4 e a razão de concentração de energia, C_e . A tabela 6.6 apresenta resultados para a curva a , de A_{ap} , e a tabela 6.7, para a curva b , de A_{ap} . Os dados foram expostos para cada semieixo e para o diâmetro, sendo este, a soma dos dois semieixos.

Os valores para o fator de interceptação, γ , coincidiram para ambas as tabelas 6.6 e 6.7, pois, embora possam haver dois limites as curvas A_{ap} (curvas a e b), o fluxo é medido pelo valor na escala de cinza em cada pixel das figuras 6.31, ou seja, pela luminosidade da imagem focal. Para os diâmetros máximos, w_y e w_z , os valores de γ foram entre 0,87 e 0,99. Para os diâmetros do núcleo, os mínimos de w_y e w_z , γ variou entre 0,41 e 0,65. Os

Tabela 6.6 – Resultado dos fluxos de radiação solar total e segmentado no foco do concentrador solar Scheffler Sul para curva de variação de A_a mais intensa (curva a).

Imagem	Soma de pixel	F_{cinza}	$G_{f,\gamma}$ (kW)	γ	$\frac{g_{f,max}}{(\text{kW}/\text{m}^2)}$	C_e
Q1	$3,94 \times 10^9$		1255 ± 49	1,00		
Q1 _{wymin}	$1,96 \times 10^9$		625 ± 24	0,50		
Q1 _{wzmin}	$1,94 \times 10^9$	$3,189 \times 10^{-7}$	619 ± 24	0,49	299,4	301
Q1 _{wymax}	$3,83 \times 10^9$		1221 ± 48	0,97		
Q1 _{wzmax}	$3,65 \times 10^9$		1164 ± 45	0,93		
N2	$6,92 \times 10^9$		993 ± 39	1,00		
N2 _{wymin}	$2,90 \times 10^9$		422 ± 17	0,42		
N2 _{wzmin}	$2,84 \times 10^9$	$1,435 \times 10^{-7}$	413 ± 16	0,41	161,1	206
N2 _{wymax}	$6,87 \times 10^9$		987 ± 39	0,99		
N2 _{wzmax}	$6,72 \times 10^9$		965 ± 38	0,97		
K3	$5,59 \times 10^9$		1184 ± 47	1,00		
K3 _{wymin}	$2,98 \times 10^9$		632 ± 25	0,53		
K3 _{wzmin}	$2,85 \times 10^9$	$2,117 \times 10^{-7}$	604 ± 24	0,51	235,9	279
K3 _{wymax}	$5,42 \times 10^9$		1147 ± 45	0,97		
K3 _{wzmax}	$5,24 \times 10^9$		1111 ± 44	0,94		
N4	$7,15 \times 10^9$		1897 ± 75	1,00		
N4 _{wymin}	$4,63 \times 10^9$		1228 ± 49	0,65		
N4 _{wzmin}	$3,43 \times 10^9$	$2,655 \times 10^{-7}$	910 ± 36	0,48	205,7	247
N4 _{wymax}	$6,19 \times 10^9$		1643 ± 65	0,87		
N4 _{wzmax}	$6,35 \times 10^9$		1685 ± 67	0,89		

Tabela 6.7 – Resultado dos fluxos de radiação solar total e segmentado no foco do concentrador solar Scheffler Sul para curva de variação de A_a menos intensa (curva b).

Imagem	Soma de pixel	F_{cinza}	$G_{f,\gamma}$ (kW)	γ	$g_{f,max}$ (kW/m ²)	C_e
Q1	$3,94 \times 10^9$		1577 ± 62	1,00		
Q1 _{wymin}	$1,96 \times 10^9$		785 ± 31	0,50		
Q1 _{wzmin}	$1,94 \times 10^9$	$4,010 \times 10^{-7}$	778 ± 30	0,49	376,5	378
Q1 _{wymax}	$3,83 \times 10^9$		1534 ± 60	0,97		
Q1 _{wzmax}	$3,65 \times 10^9$		1463 ± 57	0,93		
N2	$6,92 \times 10^9$		1244 ± 49	1,00		
N2 _{wymin}	$2,90 \times 10^9$		528 ± 21	0,42		
N2 _{wzmin}	$2,84 \times 10^9$	$1,797 \times 10^{-7}$	518 ± 20	0,41	201,8	258
N2 _{wymax}	$6,87 \times 10^9$		1236 ± 49	0,99		
N2 _{wzmax}	$6,72 \times 10^9$		1208 ± 48	0,97		
K3	$5,59 \times 10^9$		1413 ± 56	1,00		
K3 _{wymin}	$2,98 \times 10^9$		754 ± 30	0,53		
K3 _{wzmin}	$2,85 \times 10^9$	$2,527 \times 10^{-7}$	721 ± 29	0,51	281,6	332
K3 _{wymax}	$5,42 \times 10^9$		1369 ± 54	0,97		
K3 _{wzmax}	$5,24 \times 10^9$		1326 ± 52	0,94		
N4	$7,15 \times 10^9$		1772 ± 70	1,00		
N4 _{wymin}	$4,63 \times 10^9$		1147 ± 45	0,65		
N4 _{wzmin}	$3,43 \times 10^9$	$2,480 \times 10^{-7}$	850 ± 34	0,48	192,1	231
N4 _{wymax}	$6,19 \times 10^9$		1535 ± 61	0,87		
N4 _{wzmax}	$6,35 \times 10^9$		1574 ± 62	0,89		

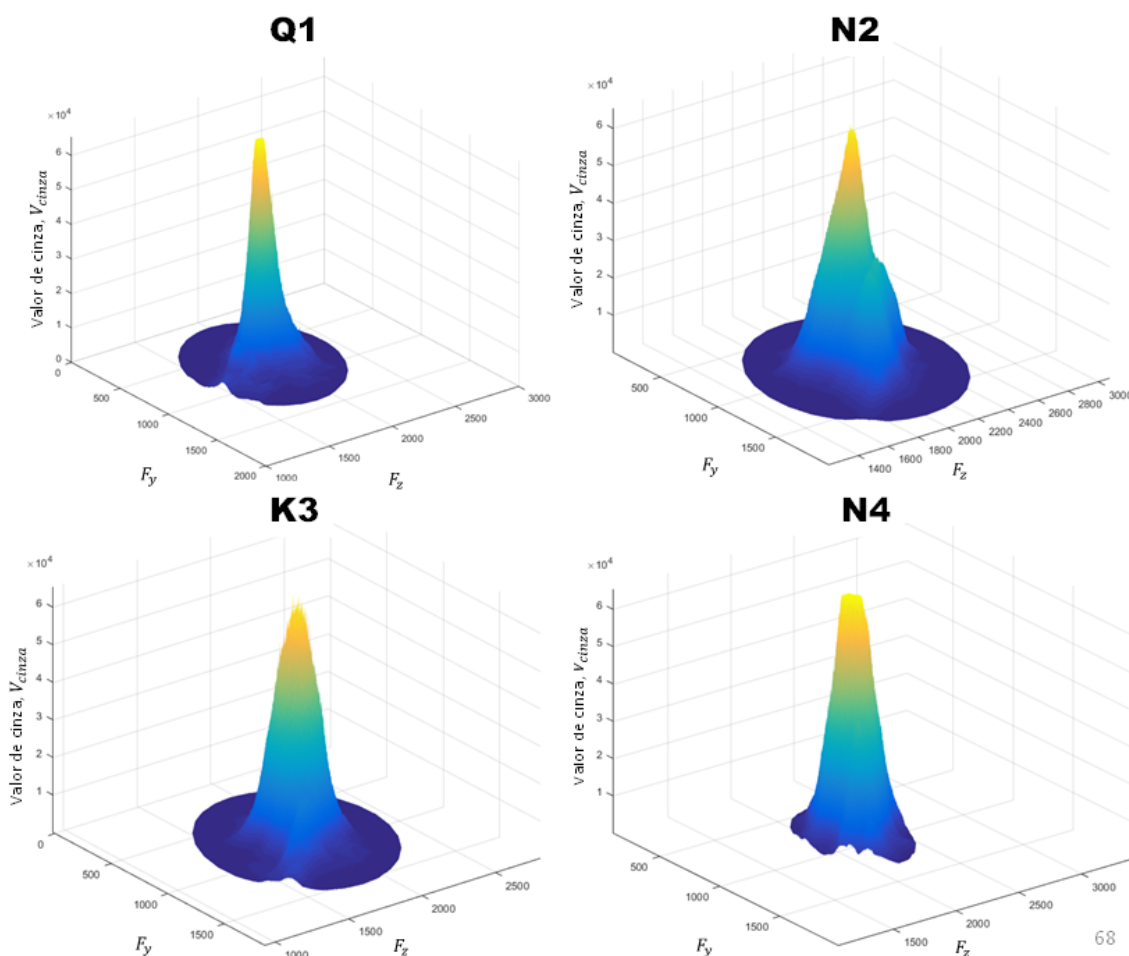


Figura 6.34 – Superfície do fluxo de energia no núcleo do foco após aplicação das máscaras com diâmetro de $w_{y,max}$, com $\theta_c = 47,5$ mrad.

valores de γ foram calculados pela equação 4.23.

Os valores do pico de fluxo de energia e da razão de concentração de energia ($C_e = g_{f,max}/DNI$) mostrado pelas tabelas 6.6 e 6.7 variaram de forma diferente das curvas mostrada nas figuras de 6.13 a 6.15, que mostram uma tendência crescente no pico de energia do solstício capricórnio para o solstício de câncer para o CSS. Isso ocorreu devido à diferença no DNI entre ambos os dias e ao sistema de rastreamento sazonal ser ajustado manualmente. Os valores para C_e variaram entre 206 e 301 para a curva a e entre 258 e 378 para a curva b .

A figura 6.36 apresenta as simulações das variações no diâmetro de w_y e w_z , mínimos e máximos para as quatro imagens de foco, Q1, N2, K3 e N4. Estas dimensões foram utilizadas para as máscaras as figuras de 6.31 a 6.35. Para as dimensões mínimas, as variações entre as imagens de Q1 a K3 foram pequenas, pois o intervalo foi de 51 dias. A imagem N4, feita 75 dias após K3, apresenta variações mais significativas. A curva da figura 6.2 mostra que o diâmetro $w_{y,a}$ coincide com $w_{y,min}$, mas na figura 6.36, estes valores apresentaram uma diferença, que é devido aos semieixos w_{y1a} e $w_{y1,min}$, pois, quanto maior

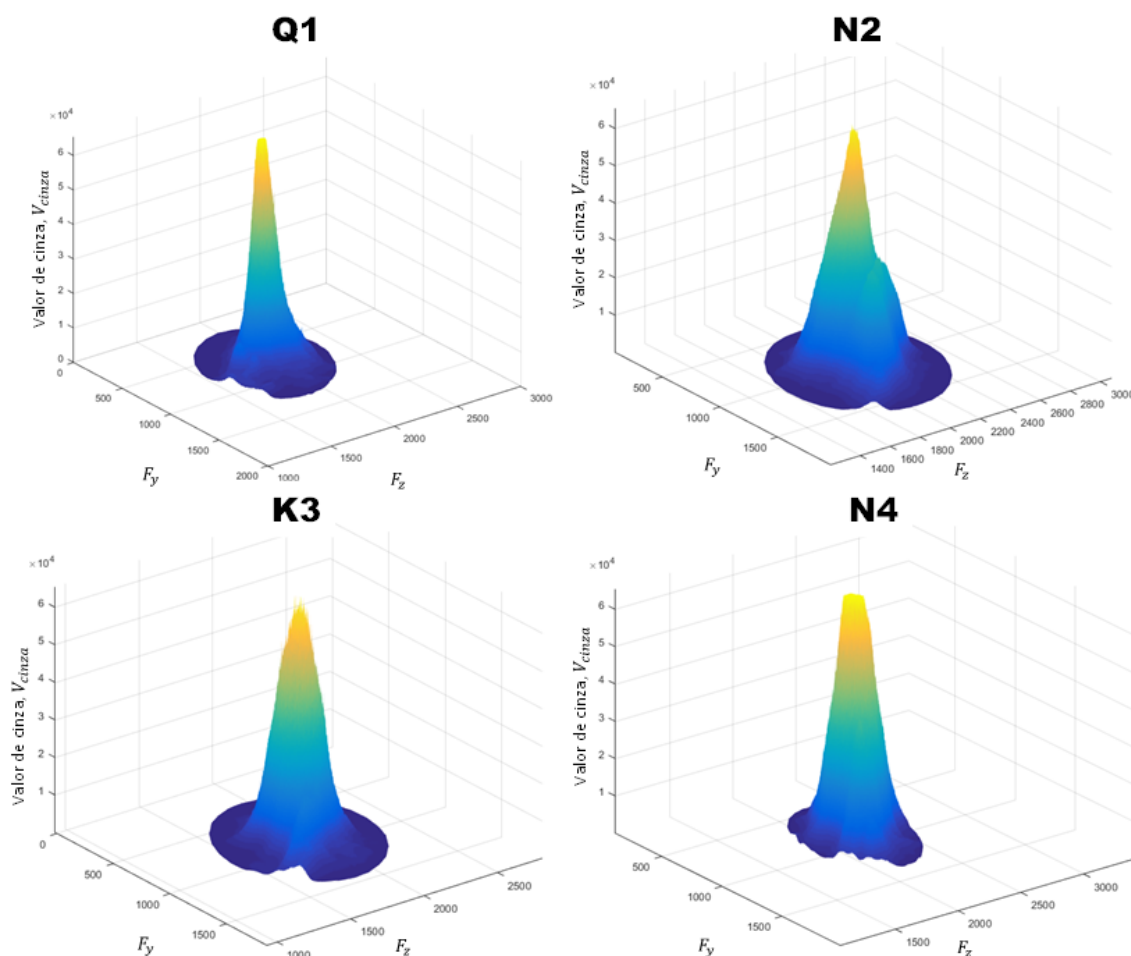


Figura 6.35 – Superfície do fluxo de energia no núcleo do foco após aplicação das máscaras com diâmetro de $w_{z,max}$, com $\theta_c = 47,5$ mrad.

for θ_c , mais próximo do Solstício de Capricórnio são as separações entre as curvas de $w_{y,a}$ e $w_{y,min}$.

As medidas máximas na figura 6.36 variaram em sentido oposto às mínimas, quer dizer, são menores para N4. As curvas mostram que o maior diâmetro para as imagens Q1, N2, K3 é $w_{y,max}$. Em N4, o maior diâmetro é $w_{z,max}$. Essa inversão é confirmada pela figura 6.1. As curvas das figuras 6.36 e 6.1, também indicam maior estabilidade dimensional para diâmetros mínimos e máximos de w_z .

A figura 6.37 apresenta um gráfico de barras que compara a quantidade de energia solar concentrada disponível nas imagens experimentais para cada fator de interceptação das imagens mostrada nas figuras de 6.31 a 6.35. As barras para G_{fa} são referentes à curva a de A_{ap} . As barras G_{fb} , são para a variação da curva b . Próximo à base de cada barra, há referência para o respectivo diâmetro w_y e w_z .

A imagem do foco N4 mostra a maior quantidade de fluxo de energia concentrada em todos os diâmetros, pois, apesar da irradiância sobre o concentrador em N4 não ter sido a maior (ver tabela 6.5), a área de abertura, para ambas as curvas a e b é maior para

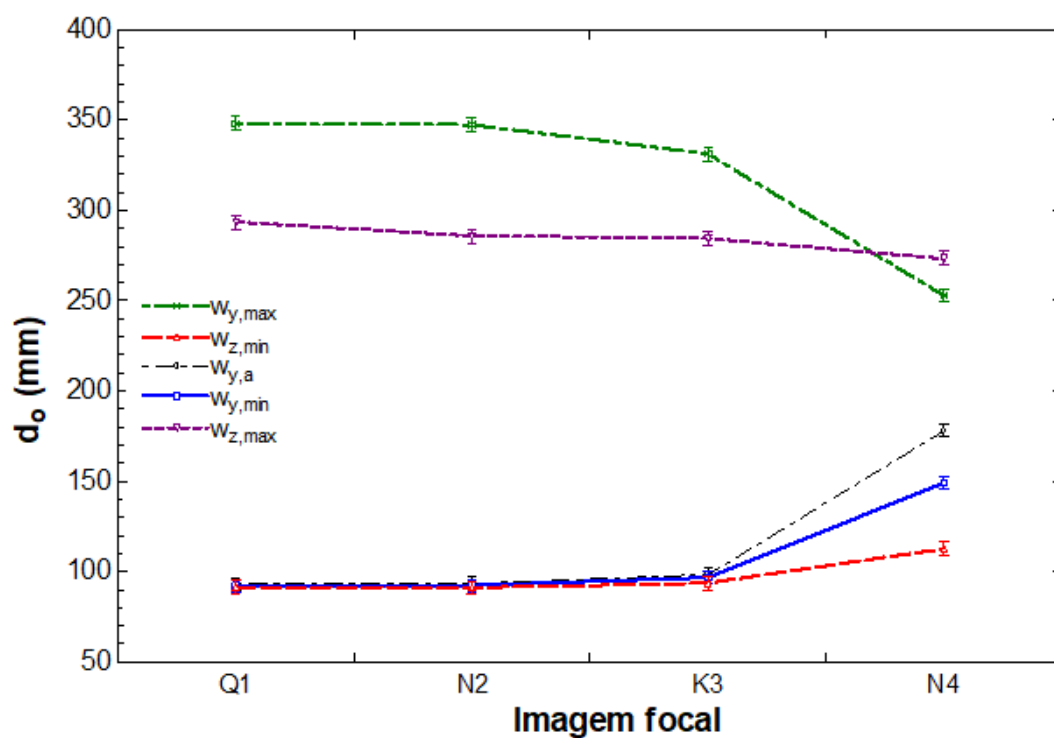


Figura 6.36 – Variação dos diâmetros de diferentes intercepções nas quatro imagens do foco do concentrador solar Scheffler Sul.

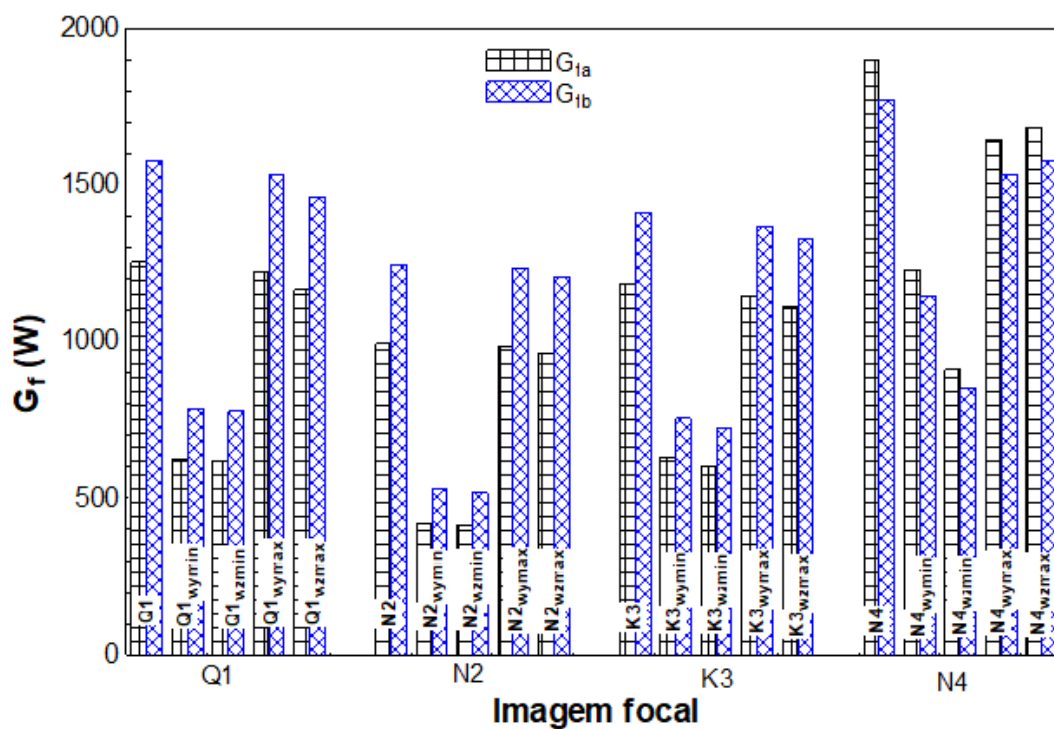


Figura 6.37 – Fluxo de energia nas imagens Q1, N2, K3 e N4 e nas intercepções para as curvas de área de aberturas a e b .

esta declinação. Por outro lado, o fluxo do foco N2 foi o menor apresentado. N2 não é a imagem cuja área de abertura do refletor seja a menor, apesar de estar próxima das menores, mas foi o dia com menor irradiância solar.

Entre os diâmetros w_y e w_z máximos, o fluxo é maior para w_z somente em N4, de acordo com a respectiva curva da figura 6.36. Para as imagens de Q1 a K3 o fluxo na interceptação $w_{y,max}$ foi maior que outras interceptações. Entre todas as imagens de foco, as interceptações $w_{y,max}$ e $w_{z,max}$ não apresentaram diferenças significativas de fluxo, cujas variações foram de 4,9%, 2,3%, 3,2% e 2,5% para Q1, N2, K3 e N4, respectivamente, tanto para a curva a quanto para a curva b .

Para as medidas mínimas houve variações acima de 100%, por exemplo, entre os fluxos de $w_{y,min}$ de N2 e N4. Mas, isso ocorre devido os valores de $G_{b,T}$ e A_a terem sido menores em N2 que em N4, além das diferenças nas características de fluxo entre as imagens, causadas pelo acionamento do sistema de rastreamento sazonal (ver figura 6.31). As diferenças proporcionais dos fluxos de energia dos diâmetros $w_{y,min}$ e $w_{z,min}$ nas imagens Q1, N2, K3 e N4 foram respectivamente de 0,9%, 1,9%, 4,6% e 35%. Esse aumento na diferença do fluxo pode ser entendido pelas curvas da Figura 6.2 mostram que quanto mais próximo do Solstício de Câncer (para o CSS), maior é a distância entre $w_{y,min}$ e $w_{z,min}$.

O efeito das curvas a e b da variação área de abertura do concentrador pode ser visto pelas barras de G_{fa} e G_{fb} , respectivamente, na figura 6.37. O fluxo para G_{fb} é maior nas imagens de foco Q1, N2 e K3, enquanto G_{fa} é maior em N4. Esta inversão de intensidade ocorre nos Equinócios, nas datas $n = 80$ e 267 (ver figuras 6.8 e 6.9), quando A_a é o mesmo para ambas as curvas a e b . O registro da imagem N4 foi feito no dia $n = 103$. Por outro lado, quanto mais próximo for dos Solstícios maiores serão as diferenças entre G_{fa} e G_{fb} . Isso é possível ser visto nos fluxos G_{fa} e G_{fb} para as imagens Q1 e K3. Mesmo para a imagem N4, a diferença entre foi a menor G_{fa} e G_{fb} , pois é a data mais próxima a um Equinócio.

Numa comparação mais justa entre as imagens, a figura 6.38 apresenta o fluxo de energia solar concentrada para as mesmas interceptações e curvas de A_{ap} , mas com a irradiância padronizada em $DNI = 1000 \text{ W/m}^2$. Os fluxos totais de energia foram maiores nas imagens da figura 6.38 do que nas da figura 6.37. A diferença entre os fluxos G_{fa} e G_{fb} apresentou a mesma tendência: quanto mais próximo dos equinócios, menor é a diferença. A inversão das intensidades dos fluxos também mostrou o mesmo padrão, que se invertem após cada Equinócio.

As figuras 6.37 e 6.38 também apresentaram o mesmo padrão para os fluxos mínimos e máximos. Teoricamente, a imagem Q1 deve apresentar o menor fluxo nos diâmetros $w_{y,min}$ e $w_{z,min}$, segundo as curvas das figuras 6.8. Mas, as diferenças geométricas e de luminosidade entre as imagens de foco, visíveis nas figuras de 6.31 a 6.35, sugerem que o

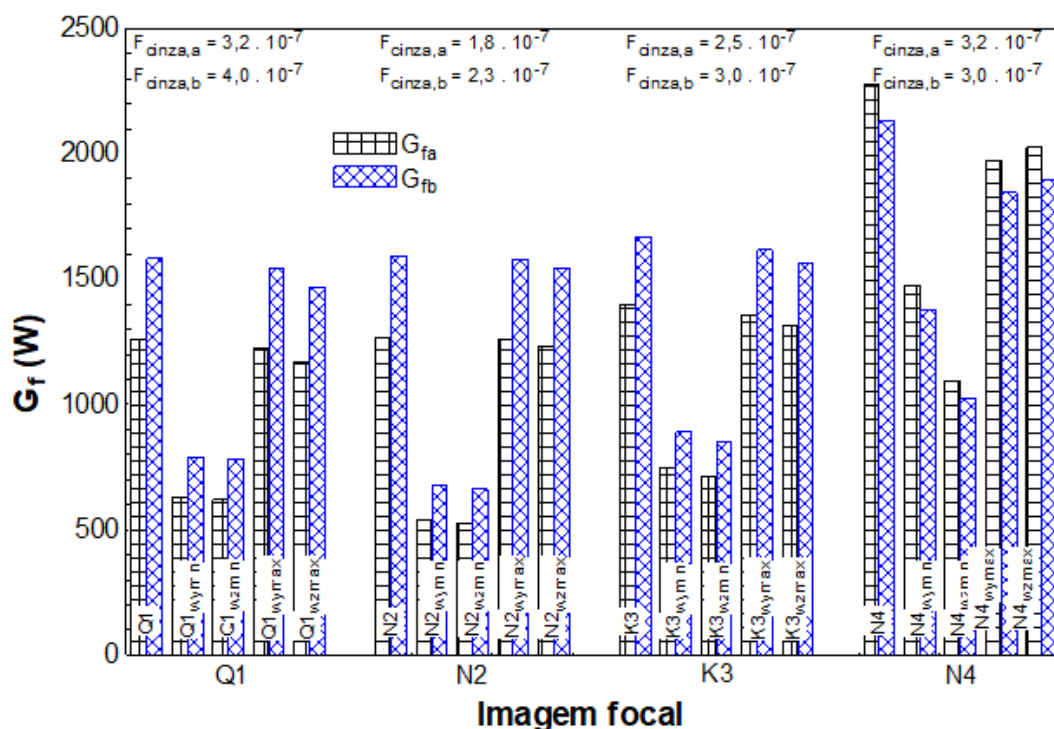


Figura 6.38 – Comparação do fluxo de radiação solar concentrada em diferentes intercepções com a irradiância normalizada em $DNI = 1000$ para as imagens Q1, N2, K3 e N4 e as áreas de aberturas das curvas *a* e *b*.

motivo do fluxo no núcleo de N2 ser menor, segundo a figura 6.38, seja devido a deformações na superfície do refletor decorrentes do acionamento do sistema de rastreamento sazonal.

A figura 6.39 apresenta curvas da análise comparativa do fluxo no foco em um diâmetro de intercepção igual para todas as imagens focais. As máscaras com os diâmetro de w_y e w_z , mínimos e máximos, para a imagem Q1 foi aplicada para as outras imagens. O mesmo foi feito com as máscaras da imagem N4. Nessa análise, a irradiância solar considerada sobre a área de abertura foi de 1000 W/m^2 . A figura à esquerda apresenta resultados para a curva *a* de A_{ap} , e a figura à direita para a curva *b*.

Todas as curvas da figura 6.39 mostram uma tendência ascendente nos fluxos das imagens de Q1 a N4 para todas as máscaras. O fluxo em N4, que foi o maior entre os dias medidos, apresentou o maior fluxo de energia em todas as curvas simuladas. Os diâmetros máximos das máscaras de Q1 foram os maiores. As máscaras com diâmetros mínimos de Q1 mostraram o menor fluxo entre todas as imagens. Essas diferenças entre máscaras de Q1 e N4 estão coerentes com as curvas da figura 6.36.

As curvas da figura 6.39(a) para $w_{y,min}$ e $w_{z,min}$ das máscaras de Q1 apresentaram os menores valores, entre 530 W e 522 W, no dia da N2 e 841 W e 829 W no dia da N4, respectivamente, e menores diferenças, entre 0,9% no dia da Q1 e 1,6% no dia da N2. Já as diferenças entre os diâmetros $w_{y,min}$ e $w_{z,min}$ para o núcleo das máscaras de N4 variaram entre 18% em Q1 e 35% em N2. Por outro lado, a variação entre as máscaras com

diâmetros máximos $w_{y,max}$ e $w_{z,max}$ apresentaram baixas diferenças entre si. As máscaras de Q1 variaram entre 1,9%, em N2 e 4,8%, em Q1, enquanto as máscaras de N4 variaram entre 1,3% em N2 e 2,8% em Q1.

Na figura 6.39(b) as curvas também mostram uma tendência ascendente, porém com menores variações de fluxo que as da figura 6.39(a). As diferenças entre as máscaras de w_y e w_z , máximos e mínimos foram as mesmas, considerando os arredondamentos dos valores percentuais.

As curvas $Q1w_{y,min}$ e $Q1w_{z,min}$ da figura 6.39(a), e a curva $N4w_{z,min}$ da figura 6.39(b) apresentam os menores valores em N2. Este comportamento não foi apresentado pelas curvas teóricas das seções anteriores, portanto, é válido considerar a hipótese de efeito de deformação do refletor pelo acionamento do sistema de rastreamento sazonal.

As curvas da figura 6.39 foram feitas com base em um hipotético estudo de disponibilidade de energia para um dado receptor com diâmetro de abertura w . Constatase por estas curvas e pela análise teórica das seções 6.1 e 6.2 que as variações de energia para um mesmo diâmetro w são intensas. Para demandas constantes ao longo do ano, sugere-se que o projeto de concentrador Scheffler possua dois concentradores para o mesmo receptor, CSS e CSN, pois como visto anteriormente a variação da disponibilidade total de energia se equilibra, já que o CSN apresenta um comportamento exatamente oposto ao CSS.

As simulações para as variações das imagens nas fronteiras e nos núcleos se mostram concordantes com as medições experimentais. Também se verifica a partir das medições a irregularidade geométrica nas fronteiras, que variam de forma brusca com o acionamento do sistema de rastreamento sazonal, além de poder ocorrer de forma individual entre diferentes concentradores solares Scheffler, já que as deformações ocorrem de acordo com os materiais e perfis geométricos utilizados na construção, bem como pontos de soldagem

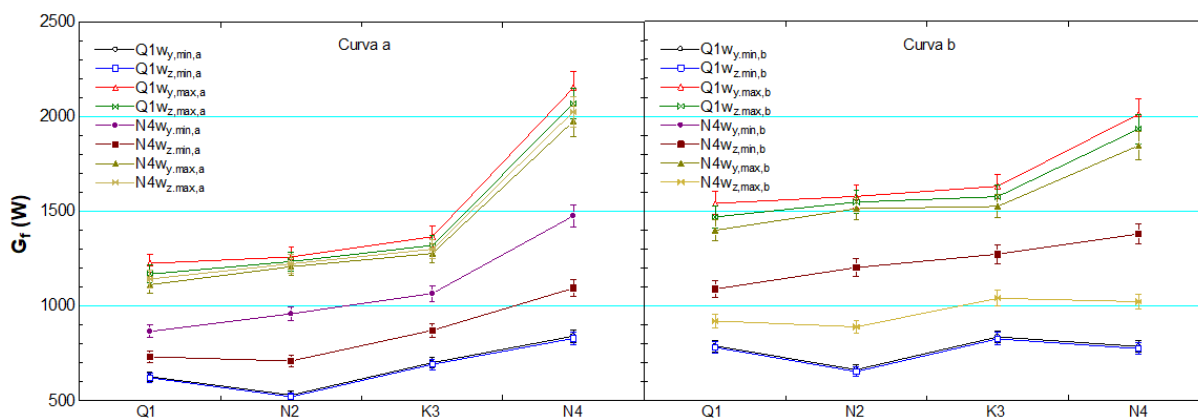


Figura 6.39 – Curvas do fluxo de radiação solar com a irradiância normalizada em $DNI = 1000 \text{ W/m}^2$ e as áreas de aberturas das curvas *a* e *b*, para diâmetros das imagens Q1 e N4 fixados em todas as imagens de foco.

e/ou usinagens das peças. Uma análise de resistência dos materiais por elementos finitos pode ser feita e medições da superfície com a técnica de fotogrametria (demonstrado por Skouri et al. (2015), por exemplo) pode revelar algumas tendências na deformação do refletor. Apesar dessas irregularidades, foi possível demonstrar as tendências da curva de fluxo para os concentradores solares do tipo Scheffler.

CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou um modelo matemático para simular as dimensões da imagem do foco e as curvas de fluxo de energia solar concentrada do refletor solar do tipo Scheffler com área de abertura teórica de 2 m^2 no Equinócio. A posição do concentrador construído na bancada deste trabalho foi no lado Sul da zona focal. Medições da imagem focal foram realizadas com uma câmera CMOS 16 bit monocromática e, posteriormente, as regiões de núcleo e fronteira foram calculadas e comparadas com os resultados teóricos.

As medições revelaram que a abertura do cone de reflexão do concentrador foi de $\theta_b = 35 \text{ mrad}$. Os espelhos utilizados possuíam $\theta_m = 12,5 \text{ mrad}$, resultando em um cone de $\theta_c = 47,5 \text{ mrad}$ mais a abertura devido ao disco solar $\theta_s = 4,7 \text{ mrad}$. Foram simuladas e medidas as variações na área de abertura do concentrador Scheffler nas dimensões e no fluxo da imagem do foco. Duas condições de contorno para a variação da área de abertura do refletor, devido ao acionamento do sistema de rastreamento sazonal, foram consideradas. Na primeira condição de contorno, o refletor se deforma perfeitamente, como a curva teórica do paraboloide. Na segunda, a superfície do refletor permanece rígida, e a única variação ocorre devido à inclinação imposta pelo sistema de rastreamento sazonal. Os registros feitos pela câmera CMOS revelaram variações bruscas nas fronteiras das imagens, porém demonstraram a tendência das curvas de fluxo de radiação concentrada observada nas simulações realizadas. Para o refletor Scheffler Sul, as fronteiras w_y e w_z são menores no Solstício de Câncer, mas os núcleos w_y e w_z são maiores nesta mesma data. No Solstício de Capricórnio, as fronteiras são maiores, mas os núcleos, menores.

Uma análise de disponibilidade de energia no foco foi realizada experimentalmente. Nos dias de medições próximos ao Solstício de Câncer, em $n = 342$, as medidas dos diâmetros do núcleo, $w_{y,min}$ e $w_{z,min}$, foram 92 mm e 91 mm, respectivamente. O fluxo total de radiação solar foi de 627 W e 622 W, para a primeira condição de contorno e 788 W e 781 W para a segunda condição de contorno, respectivamente. As medidas dos diâmetros $w_{y,max}$ e $w_{z,max}$ para a fronteira foram de 348 mm e 294 mm, respectivamente. Os fluxos totais para estas medidas foram de 1112 W e 1143 W para a primeira condição de contorno e 1398 W e 1436 W para a segunda condição de contorno, respectivamente. As medições mais próximas ao Solstício de Câncer foram no dia $n = 103$, e os diâmetros $w_{y,min}$ e $w_{z,min}$ do núcleo para este dia foram 149 mm e 113 mm, respectivamente, com fluxos de 841 W e 829 W, para uma condição de contorno e 786 W e 775 W para a outra condição de contorno, respectivamente. Para a fronteira, os diâmetros $w_{y,max}$ e $w_{z,max}$ mediam 253

mm e 273 mm, respectivamente, com fluxos de 1975 W e 2025 W em uma condição de contorno e 1845 W e 1892 W em outra condição de contorno, respectivamente. As medidas para os diâmetros (ou semieixos) w_z mínimos e máximos apresentaram maior estabilidade dimensional ao longo do ano. Entretanto, as variações na intensidade do fluxo, mesmo para diâmetros com pouca variação ao longo do ano, mostraram variações significativas. Apesar das grandes variações de fluxo de energia solar concentrada na imagem focal do concentrador Scheffler conforme o sistema de rastreamento sazonal é acionado, é possível mitigar estas variações pela instalação de outro concentrador no sentido oposto, ou seja, um concentrador solar Scheffler direcionado para o Norte e outro, para o Sul, com ambas as zonas focais coincidentes, de forma a possibilitar a instalação de um único receptor.

As simulações para as variações das imagens nas fronteiras e nos núcleos mostraram-se concordantes com as medições experimentais. Também foi verificado nas medições a irregularidade geométrica nas fronteiras, que variam de forma brusca com o acionamento do sistema de rastreamento sazonal, além de poder ocorrer de forma individual entre diferentes concentradores solares Scheffler, já que as deformações ocorrem de acordo com os materiais e perfis geométricos utilizados na construção, bem como pontos de soldagem e/ou usinagens das peças. Apesar dessas irregularidades, foi possível demonstrar as tendências da curva de fluxo de concentradores solares do tipo Scheffler.

As curvas da figura 6.39 foram feitas com base em um hipotético estudo de disponibilidade de energia para um dado receptor com diâmetro de abertura w . Foi visto, por estas curvas e pela análise teórica das seções 6.2 e 6.1 que as variações de energia para um mesmo diâmetro w são intensas. Para demandas constantes ao longo do ano, sugere-se que o projeto de concentrador Scheffler possua dois concentradores para o mesmo receptor, CSS e CSN, pois, conforme visto anteriormente, a variação da disponibilidade total de energia se equilibra, embora tenham as variações dimensionais, já que o CSN apresenta um comportamento exatamente oposto ao CSS.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se primeiramente realizar medições da imagem do foco por, pelo menos, um ano para uma validação mais confiável e exaustiva do modelo, já que o presente trabalho limitou a validação ao período em torno do solstício de capricórnio. Após cada medição da imagem do foco, pode ser realizada uma medição com técnica de fotogrametria para uma melhor compreensão de como ocorrem as deformações no refletor, para, então, estudar diferentes métodos de fabricação da estrutura com o objetivo de diminuir as irregularidades na borda da imagem do foco. O modelo apresentado neste trabalho pode ser utilizado para dimensionamento de receptores com abertura de cavidades e com uma região de pré aquecimento externa, com auxílio das equações para definições de núcleo e de região periférica do foco demonstradas, para obtenção de melhores eficiências térmica e ótica de receptores para concentradores solares Scheffler.

REFERÊNCIAS

- ALANOD-SOLAR. •. [S.l.], 2010. 20 p. Disponível em: <www.alanod-solar.com/en/Reflection>.
- ALANOD-SOLAR. *Efficiency Solar Surfaces*. [S.l.], 2014. 12 p. Disponível em: <www.alanod-solar.com/en/Reflection>.
- ALMERÍA, P. S. de. *Informações gerais*. 2019. Disponível em: <<http://www.psa.es/es/index.php>>.
- BALLESTRÍN, J. et al. Diagnosis of a lambertian target in solar context. *Measurement*, Elsevier, v. 119, p. 265–269, 2018.
- BALLESTRÍN, J. et al. Simplifying the measurement of high solar irradiance on receivers. application to solar tower plants. *Renewable energy*, Elsevier, v. 138, p. 551–561, 2019.
- BALLESTRÍN, J.; MONTERREAL, R. Hybrid heat flux measurement system for solar central receiver evaluation. *Energy*, Elsevier, v. 29, n. 5-6, p. 915–924, 2004.
- BHIRUD, N.; TANDALE, M. Field evaluation of a fixed-focus concentrators for industrial oven. *Proceedings of Advances in Energy Research (AER-2006)*, IITB, Mumbai, 2006.
- BODE, S.-J.; GAUCHE, P.; LANDMAN, W. The design and testing of a small scale solar flux measurement system for central receiver plant. In: STELLENBOSCH UNIVERSITY. *Annual Student Symposium*. [S.l.], 2012.
- CHANDAK, A.; SOMANI, S. K. Design of multistage evaporators for integrating with scheffler solar concentrators for food processing applications. In: . Indore, Índia: [s.n.], 2009.
- CHANDRASHEKARA, M.; YADAV, A. An experimental study of the effect of exfoliated graphite solar coating with a sensible heat storage and scheffler dish for desalination. *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, v. 123, p. 111–122, 2017.
- DÄHLER, F. et al. Optical design and experimental characterization of a solar concentrating dish system for fuel production via thermochemical redox cycles. *Solar Energy*, Elsevier, v. 170, p. 568–575, 2018.
- DIB, E. A. *Projeto e construção de um concentrador solar de foco fixo utilizado para o aquecimento de um forno*. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Pesquisa e Tecnologia, Universidade Tiradentes, Aracaju, Sergipe, 2009. 146p.
- DIB, E. A.; FIORELLI, F. A. S. Analysis of the image produced by scheffler paraboloidal concentrator. In: IEEE. *Energy (IYCE), 2015 5th International Youth Conference on*. Pisa, Itália, 2015a. p. 1–7.
- DIB, E. A.; FIORELLI, F. A. S. Scheffler paraboloidal concentrator image analysis. In: *23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM)*. [S.l.: s.n.], 2015b.

- DIB, E. A. et al. Technical analysis of an oven with coupled receiver for scheffler solar concentrator tested under cloudy weather conditions. *Acta Scientiarum Technology*, v. 44, 2020. ISSN 1807-8664.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar engineering of thermal processes*. 4a. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. 910p.
- FUNK, P. A. Evaluating the international standard procedure for testing solar cookers and reporting performance. *Solar Energy*, Elsevier, v. 68, n. 1, p. 1–7, 2000.
- GADHIA, D. Parabolic solar concentrators for cooking and food processing. In: *International Solar Food Processing Conference*. Indore, Índia: [s.n.], 2009.
- GADHIA, D.; GADHIA, S. Parabolic solar concentrators for cooking, food processing and other applications. In: *International solar cooking conference*. Granada, Espanha: [s.n.], 2006.
- GOSWAMI, D. Y.; KREITH, F.; KREIDER, J. F. *Principles of solar engineering*. 2a. ed. Oxônia, Inglaterra: CRC Press, 2000. 694p.
- GOTZ, M. Liquid tin heat storage for scheffler parabolic cookers. In: *Encuentro Solar*. Benicarlo, Spain: [s.n.], 2003.
- HARRIS, J. A.; DUFF, W. S. Focal plane flux distributions produced by solar concentrating reflectors. *Solar Energy*, Elsevier, v. 27, n. 5, p. 403–411, 1981.
- HASHMI, S. A. A. et al. Design & fabrication of gravity based solar tracker applied on scheffler reflector. In: IEEE. *2018 International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET)*. [S.l.], 2018. p. 1–4.
- HERNÁNDEZ, N. et al. Conical receiver for a paraboloidal concentrator with large rim angle. *Solar Energy*, Elsevier, v. 86, n. 4, p. 1053–1062, 2012.
- JETER, S. The distribution of concentrated solar radiation in paraboloidal collectors. *Journal of Solar Energy Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 108, n. 3, p. 219–225, 1986.
- JOHNSTON, G. Flux mapping the 400 m² “big dish” at the australian national university. 1995.
- JOHNSTON, G. On the analysis of surface error distributions on concentrated solar collectors. *Journal of Solar Energy Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 117, n. 4, p. 294–296, 1995.
- JOHNSTON, G. Focal region measurements of the 20 m² tiled dish at the australian national university. *Solar Energy*, Elsevier, v. 63, n. 2, p. 117–124, 1998.
- JOSE, P. D. The flux through the focal spot of a solar furnace. *Solar energy*, Elsevier, v. 1, n. 4, p. 19–22, 1957.
- KALOGIROU, S. A. *Solar energy engineering: processes and systems*. 2a. ed. San Diego, California, EUA: Academic Press, 2014. 819p.

- KAUSHIKA, N.; REDDY, K. Performance of a low cost solar paraboloidal dish steam generating system. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 41, n. 7, p. 713–726, 2000.
- KUMAR, S.; KANDPAL, T.; MULLICK, S. Heat losses from a paraboloid concentrator solar cooker: experimental investigations on effect of reflector orientation. *Renewable energy*, Elsevier, v. 3, n. 8, p. 871–876, 1993.
- KUMAR, S.; KANDPAL, T.; MULLICK, S. Effect of wind on the thermal performance of a paraboloid concentrator solar cooker. *Renewable energy*, Elsevier, v. 4, n. 3, p. 333–337, 1994.
- KUMAR, S. et al. Wind induced heat losses from outer cover of solar collectors. *Renewable energy*, Elsevier, v. 10, n. 4, p. 613–616, 1997.
- LEVÊQUE, G. et al. Experimental and numerical characterization of a new 45 kw el multisource high-flux solar simulator. *Optics express*, Optical Society of America, v. 24, n. 22, p. A1360–A1373, 2016.
- LOVEGROVE, K.; BURGESS, G.; PYE, J. A new 500 m² paraboloidal dish solar concentrator. *Solar Energy*, Elsevier, v. 85, n. 4, p. 620–626, 2011.
- LUKHI, G. Food processing through solar energy. In: *International Solar Food Processing Conference*. [S.l.: s.n.], 2009.
- MULLER, C.; ARIAS, C. Solar community bakeries on the argentinean altiplano. In: *International Solar Food Processing Conference*. Granada, Espanha: [s.n.], 2009.
- MULLICK, S.; KANDPAL, T.; KUMAR, S. Thermal test procedure for a paraboloid concentrator solar cooker. *Solar Energy*, Elsevier, v. 46, n. 3, p. 139–144, 1991.
- MUNIR, A.; HENSEL, O. Solar distillation for essential oils extraction a decentralized approach for rural development. In: *International Solar Food Processing Conference, Indore, India*. [S.l.: s.n.], 2009.
- MUNIR, A.; HENSEL, O. On-farm processing of medicinal and aromatic plants by solar distillation system. *Biosystems engineering*, Elsevier, v. 106, n. 3, p. 268–277, 2010.
- MUNIR, A.; HENSEL, O.; SCHEFFLER, W. Design principle and calculations of a scheffler fixed focus concentrator for medium temperature applications. *Solar Energy*, Elsevier, v. 84, n. 8, p. 1490–1502, 2010.
- MUNIR, A. et al. Design, development and experimental results of a solar distillery for the essential oils extraction from medicinal and aromatic plants. *Solar Energy*, Elsevier, v. 108, p. 548–559, 2014.
- NEUMANN, A. et al. Representative terrestrial solar brightness profiles. *J. Sol. Energy Eng.*, v. 124, n. 2, p. 198–204, 2002.
- NREL, N. R. E. L. *Generation 3 Concentrating Solar Power Systems*. 2019. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/csp/generation-3-concentrating-solar-power-systems.html>>.
- NYAHORO, P. K.; JOHNSON, R. R.; EDWARDS, J. Simulated performance of thermal storage in a solar cooker. *Solar energy*, Elsevier, v. 59, n. 1, p. 11–17, 1997.

- OELHER, U.; SCHEFFLER, W. The use of indigenous materials for solar conversion. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 33, p. 379–387, 1994.
- PATIL, R. J.; AWARI, G. K.; SINGH, M. P. Experimental analysis of scheffler reflector water heater. *Thermal Science*, v. 15, n. 3, p. 599–604, 2011.
- PEREIRA, E. B. et al. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. 2a. ed. [S.l.]: INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017.
- PROVENZA, F. Pro-tec–projeta de máquinas. *Escola Protec*. São Paulo, 1996.
- RABL, A. Comparison of solar concentrators. *Solar Energy*, Elsevier, v. 18, n. 2, p. 93–111, 1976.
- RAZA, A. et al. Soybean roasting using continuous solar roaster—a decentralized approach for agricultural processing. *Journal of Food Process Engineering*, Wiley Online Library, v. 42, n. 6, p. e13184, 2019.
- REDDY, D. S.; KHAN, M. K. Design and ray tracing of multifaceted scheffler reflector with novel crossbars. *Solar Energy*, Elsevier, v. 185, p. 363–373, 2019.
- REDDY, D. S. et al. Design charts for scheffler reflector. *Solar Energy*, Elsevier, v. 163, p. 104–112, 2018.
- REDDY, K.; NATARAJAN, S. K.; VEERSHETTY, G. Experimental performance investigation of modified cavity receiver with fuzzy focal solar dish concentrator. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 74, p. 148–157, 2015.
- RIES, H.; SCHUBNELL, M. The optics of a two-stage solar furnace. *Solar Energy Materials*, Elsevier, v. 21, n. 2, p. 213–217, 1990.
- RIVEROS-ROSAS, D. et al. Influence of the size of facets on point focus solar concentrators. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 36, n. 3, p. 966–970, 2011.
- RÖGER, M. et al. Techniques to measure solar flux density distribution on large-scale receivers. *Journal of Solar Energy Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 136, n. 3, p. 031013, 2014.
- RUELAS, J.; PALOMARES, J.; PANDO, G. Absorber design for a scheffler-type solar concentrator. *Applied Energy*, Elsevier, v. 154, p. 35–39, 2015.
- RUELAS, J. et al. Ray tracing study to determine the characteristics of the solar image in the receiver for a scheffler-type solar concentrator coupled with a stirling engine. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 57, p. 2858–2866, 2014.
- RUELAS, J.; VELÁZQUEZ, N.; CERESO, J. A mathematical model to develop a scheffler-type solar concentrator coupled with a stirling engine. *Applied Energy*, Elsevier, v. 101, p. 253–260, 2013.
- SANTOS, P. et al. Aplicação de um concentrador solar tipo scheffler para o preparo de pães. In: ABENS. *Anais do V Congresso Brasileiro de Energia Solar*. [S.l.], 2014.
- SANTOS, P. C. et al. Aplicação de um concentrador solar tipo scheffler para o preparo de pães. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 6, n. 2, p. 122–127, 2016.

- SCHAPERS, G. Agave syrup production - a sweet tradition goes solar. In: *International Solar Food Processing Conference, Indore, India*. [S.l.: s.n.], 2009.
- SCHEFFLER, W. Development of a solar crematorium. In: *international conference on Solar Cooker*. Granada, Espanha: [s.n.], 2006. p. 15–16.
- SCHEFFLER, W. Introduction to the revolutionary design of scheffler reflectors. In: *International Solar Cooker Conference*. Granada, Espanha: [s.n.], 2006.
- SCHMITZ, M. et al. On-sun optical characterization of a solar dish concentrator based on elliptical vacuum membrane facets. *Solar Energy*, Elsevier, v. 153, p. 732–743, 2017.
- SENTHIL, R.; CHERALATHAN, M. Effect of once-through and recirculated fluid flow on thermal performance of parabolic dish solar receiver. *Indian Journal of Science and Technology*, v. 9, n. 33, 2016.
- SHUAI, Y.; XIA, X.-L.; TAN, H.-P. Radiation performance of dish solar concentrator/cavity receiver systems. *Solar Energy*, Elsevier, v. 82, n. 1, p. 13–21, 2008.
- SKOURI, S. et al. Optical qualification of a solar parabolic concentrator using photogrammetry technique. *Energy*, Elsevier, v. 90, p. 403–416, 2015.
- SOLARE-BRUECKE. *Apresenta informações sobre Wolfgang Scheffler, o desenvolvedor do concentrador solar Scheffler, e disponibiliza diretrizes para construção do concentrador solar Scheffler*. 2017. Disponível em: <www.solare-bruecke.org>.
- STEINFELD, A.; SCHUBNELL, M. Optimum aperture size and operating temperature of a solar cavity-receiver. *Solar Energy*, Elsevier, v. 50, n. 1, p. 19–25, 1993.
- TYROLLER, M. Solar steam sterilizer for rural hospitals. In: *International Solar Cooker Conference*. Granada, Espanha: [s.n.], 2006.
- ULMER, S. et al. Beam characterization and improvement with a flux mapping system for dish concentrators. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME Solar 2002: International Solar Energy Conference*. [S.l.], 2002. p. 285–292.
- VANNONI, C. et al. Potential for solar heat in industrial processes. *IEA SHC Task*, v. 33, p. 174, 2008.
- VATELL. *Informações sobre o sensor de Gardon*. 2020. Disponível em: <<http://www.vatell.com/node/4>>.
- VENKATACHALAM, T.; CHERALATHAN, M. Effect of aspect ratio on thermal performance of cavity receiver for solar parabolic dish concentrator: An experimental study. *Renewable energy*, Elsevier, v. 139, p. 573–581, 2019.

Apêndices

APÊNDICE A – TESTE EM AMOSTRAS DE TRATAMENTO SUPERFICIAL PARA O ALVO LAMBERTIANO

Duas amostras com diferentes tratamentos superficiais foram analisadas para definição do método de tratamento de superfície do alvo lambertiano. As amostras tinham dimensões de 90 mm x 90 mm x 6 mm. O tratamento consistiu primeiramente no jateamento com granalha de aço, para obtenção de rugosidade. Posteriormente, uma das amostras foi recoberta com Al_2O_3 por aspersão térmica, e a outra amostra foi pintada com uma tinta à base de alumínio. Os dois processos foram escolhidos em função da disponibilidade local. A dimensão foi definida devido ao forno para cura da amostra pintada.

A análise foi realizada com as amostras colocadas em um suporte com um medidor de ângulo. Um luminômetro (figura 5.7) foi utilizado para medir a luminância em cd/m^2 , em diferentes ângulos, conforme a tabela A.1.

Diferentes testes foram realizados em ambiente interno e externo. No ambiente interno, o primeiro teste foi com lâmpada incandescente em túnel de iluminação, para evitar influências do ambiente interno. No segundo teste, a amostra foi exposta à iluminação fluorescente do ambiente. Nos testes externos, a amostra foi submetida à radiação difusa e direta em diferentes condições climáticas.

O erro foi definido como $erro = \frac{\text{desvio padrão}}{\text{média}}$



Figura A.1 – Teste de luminância em amostra sob céu nublado.

Tabela A.1 – Ensaio de luminância de amostrar de chapa de aço com dois diferentes tratamentos na superfície.

Ângulo de medição (°)	Ensaio com lâmpada a 45°		Ensaio com lâmpada fluorescente		Ensaio sob radiação solar difusa		Ensaio sob radiação solar difusa e direta		Ensaio sob radiação solar difusa e direta ¹	
	Pintada	Aspergida	Pintada	Aspergida	Pintada ²	Aspergida ³	Pintada ⁴	Aspergida	Pintada	Aspergida
0	141,0	117,0	13,00	9,95	639,0	489,0/678,5	3745	3130	3870	2991
10	181,0	125,0	11,70	8,90			3302	2925	3401	2688
15					580	687				
20	220,5	134,0	11,30	8,95			2912	2809	3052	2449
30	259,0	143,0	9,45	8,80	520	588,5	2738	2758	2955	2425
40	327,0	150,0	8,10	7,95			2548	2796	2713	2398
45	367,0	156,0								
Média	212,1	130,1	12,02	9,14	579,7	503,4/651,3	3049,0	2883,6	3198,2	2590,2
Desvio padrão	100,3	18,6	2,76	0,72	59,5	20,3/54,6	478,3	151,2	449,6	252,2
Erro	0,47	0,14	0,23	0,08	0,10	0,04/0,08	0,16	0,05	0,14	0,10

¹ Variação de 9900 lux, do início das medições na placa aspergida, à 10900 lux, no final das medições na placa pintada.

² Medições interrompidas pela chuva.

³ Dados medidos no mesmo dia, mas com replica devido à variação intensa nas condições climáticas. Os dados da direita da barra foram registrados com maior variação da luminosidade do céu.

⁴ Variação de 9100 a 9600 lux em 10 minutos durante as medições.

APÊNDICE B – AJUSTES DA CÂMERA FLIR BLACKFLY[®] S

A câmera utilizada neste trabalho foi da fabricante FLIR, do modelo BlackFly[®] GigE 88S6M-C PoE Monocromática, com sensor CMOS de resolução de 4096 x 2160 pixels, profundidade de pixel (gradiente monocromático) de 24-bit, velocidade de disparo de 22 μ s a 30 s.

O software utilizado para ajustes e disparos da câmera foi o SpinView. A tabela B.1 apresenta os principais ajustes para câmera utilizados para captura da imagem focal deste trabalho, no idioma do software. A lista a seguir define os itens da tabela B.1, com base no próprio software.

- 1 Gain – Ganho é a função que força o aumento da claridade da imagem. Especificamente, essa função controla os limites mínimos e máximos dos pixels do quadro da imagem. Quando utilizado, deve-se trabalhar em harmonia com o tempo de exposição. Uma desvantagem dessa função é o aumento de ruídos dos pixels no sensor. Gain foi ajustado para 0;
- 2 Gamma – característica que suaviza a variação intensa de cor, ou brilho, entre pixels vizinhos. A intensidade da correção é na forma $P' = P^{\text{Gamma}}$, em que P é o valor numérico na escala de cinza do pixel. Gamma foi ajustado em 0 para não afetar a o pixel capturado;
- 3 Black level clamping – Corrige o efeito de corrente escura no sensor. Esse efeito ocorre devido ao calor gerado no sensor, análogo ao efeito fotovoltaico, e causa variação nos valores de pixel;
- 4 Nitidez – ajustado como 0, para manter a captura da imagem natural;
- 5 Binning – função que diminui o número de pixels da imagem (diminui a resolução). Cada pixel registrado é a média dos pixels da mesma região com resolução máxima. Essa função, embora diminua a resolução, diminui os ruídos, como variações de pixels defeituosos.

Tabela B.1 – Ajustes da câmera FLIR no software SpinView.

Função	Ajuste	Modo	Descrição
Controle de aquisição	Exposure Mode	Timed	
	<i>Exposure auto</i>	<i>off/contínua</i>	
	<i>Exposure time</i>	<i>Preencher</i>	
Analog control	<i>Ganho auto</i>	<i>off/contínuo</i>	
	Black Level Clamping	preenchido	
	Correção gama	desabilitado	
Image format control	<i>Pixel format</i>	mono16	
	ISP	desabilitado	
	<i>Binning selector</i>	<i>all</i>	
	<i>Binning horizontal</i>	<i>average</i>	
Device Control	<i>Binning vertical</i>	<i>average</i>	
	<i>Device Temperature Selector</i>	<i>Device temperature</i>	Temperatura máxima de segurança 50°C
Auto Algorithm Control	<i>ROI Selector</i>	<i>Auto White Balance</i>	Ajuste automático prioritário torna-se o tempo de exposição.
	<i>Auto exposure control priority</i>	<i>Gain priority mode</i>	
	<i>Lighting mode</i>	<i>Normal</i>	
	<i>Metering mode</i>	<i>Spot</i>	Ajusta a iluminação na região central do quadro (ROI)
Defective pixel correction	<i>Auto exposure damping</i>	0.5	
	<i>Defect correct static</i>	preenchido	
	<i>Defect correction mode</i>	<i>Average</i>	<i>highlight</i> é para análise dos pixels com defeito

APÊNDICE C – RESULTADOS TEÓRICOS PARA OS FLUXOS DE ENERGIA NA IMAGEM FOCAL DO CONCENTRADOR SOLAR SCHEFFLER

As figuras de C.1 a C.12 apresentam a curva teórica do fluxo de energia para o foco do concentrador solar CSS com $A_{ap,eq} = 2 \text{ m}^2$. As figuras de C.13 a C.24 apresentam a curva truncada para destacar a região de fluxo mais intenso de energia solar concentrada. As figuras de C.25 a C.30 apresentam a curva truncada para realçar as regiões de fronteira da imagem focal.

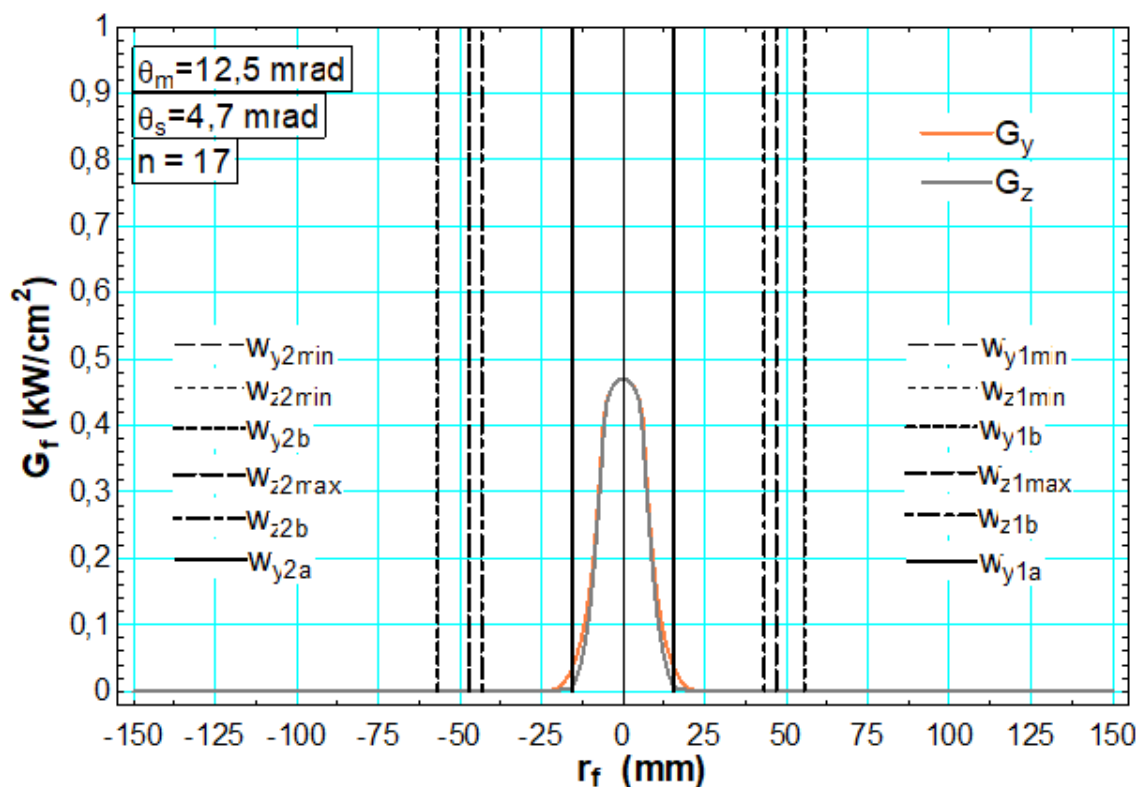


Figura C.1 – Imagens de Janeiro.

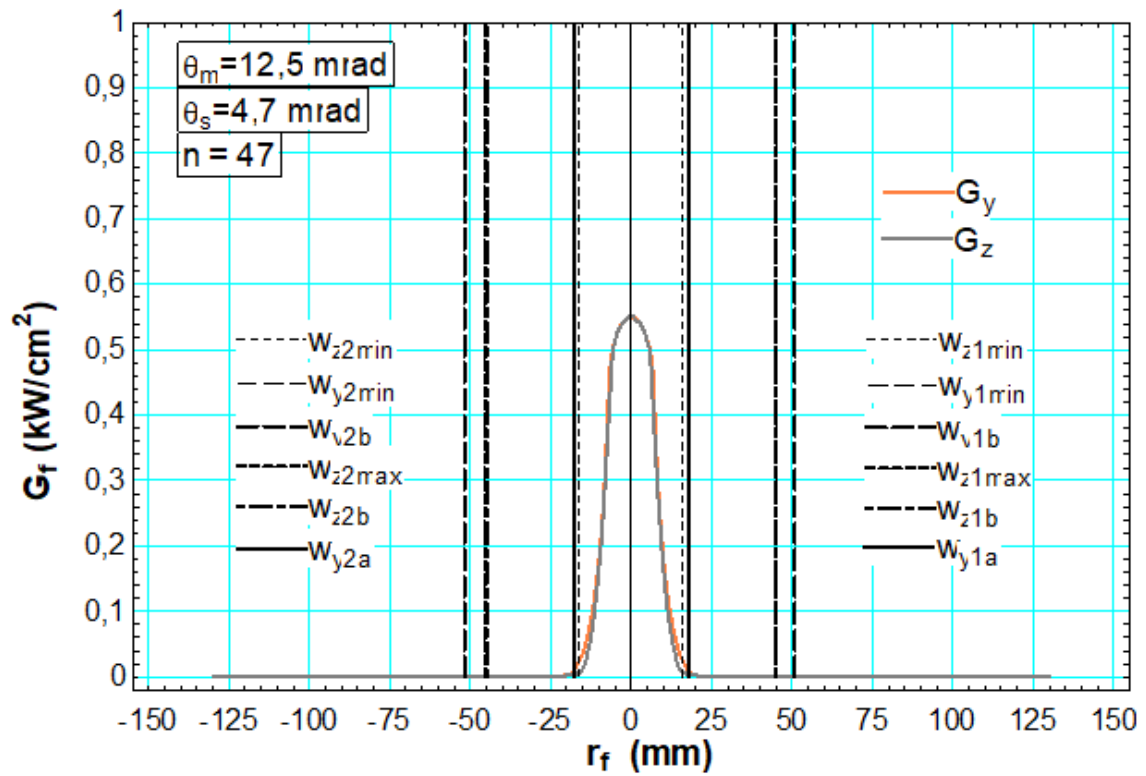


Figura C.2 – Imagens de Fevereiro.

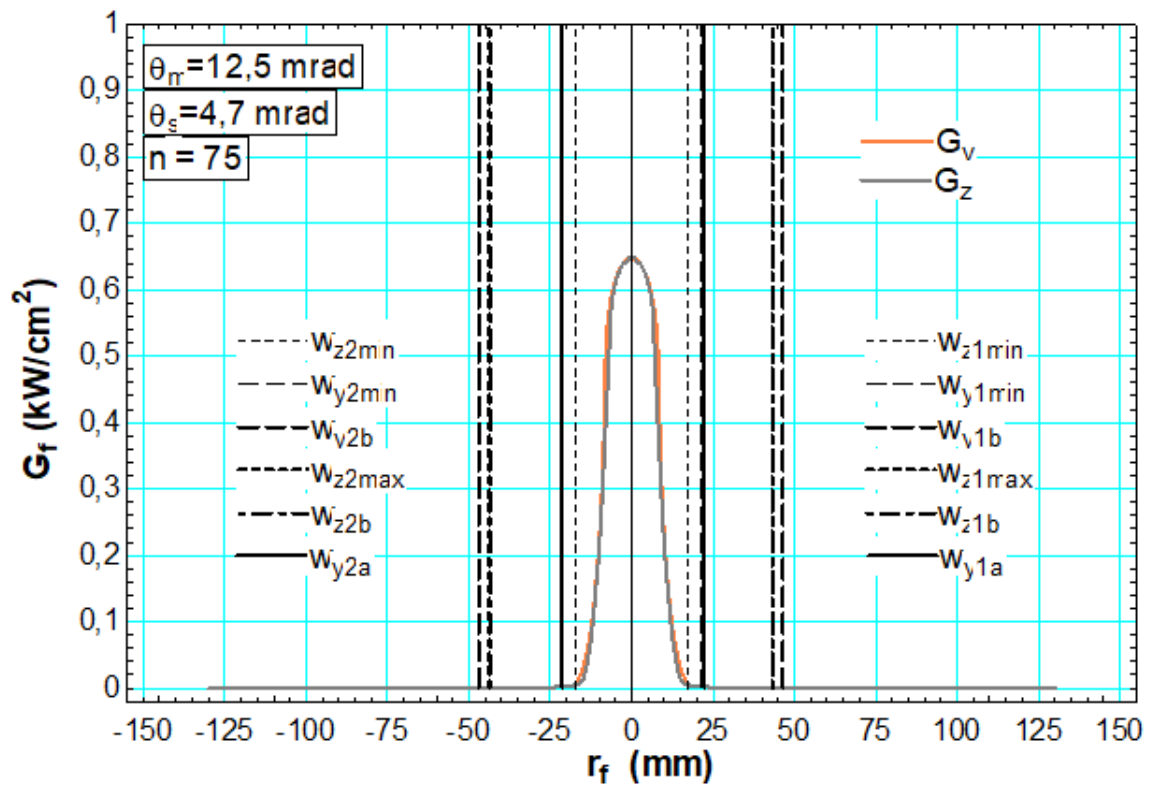


Figura C.3 – Imagens de Março.

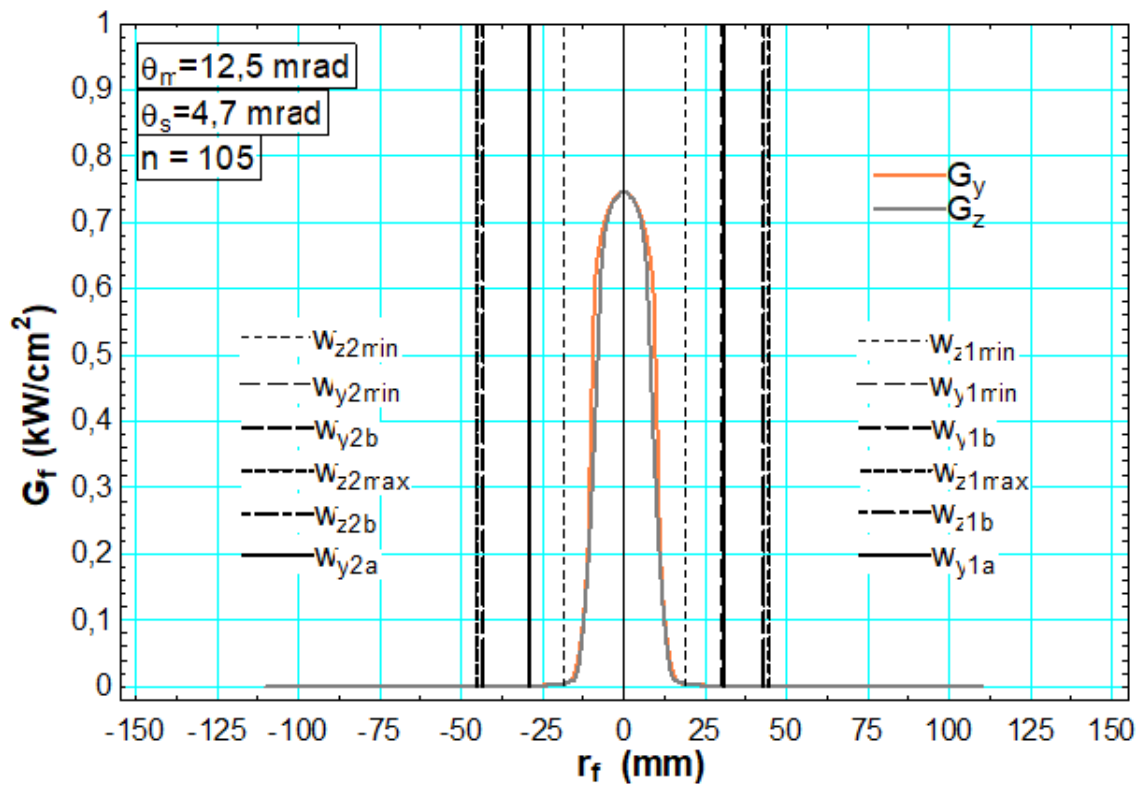


Figura C.4 – Imagens de Abril.

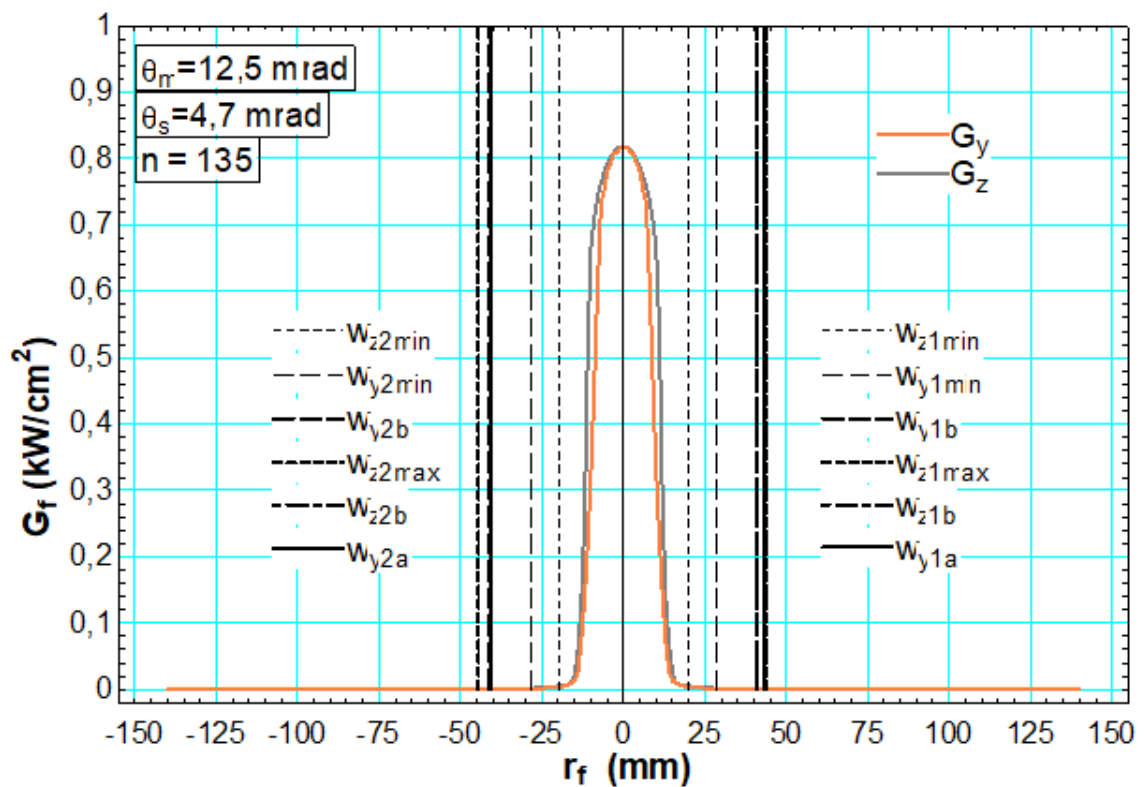


Figura C.5 – Imagens de Maio.

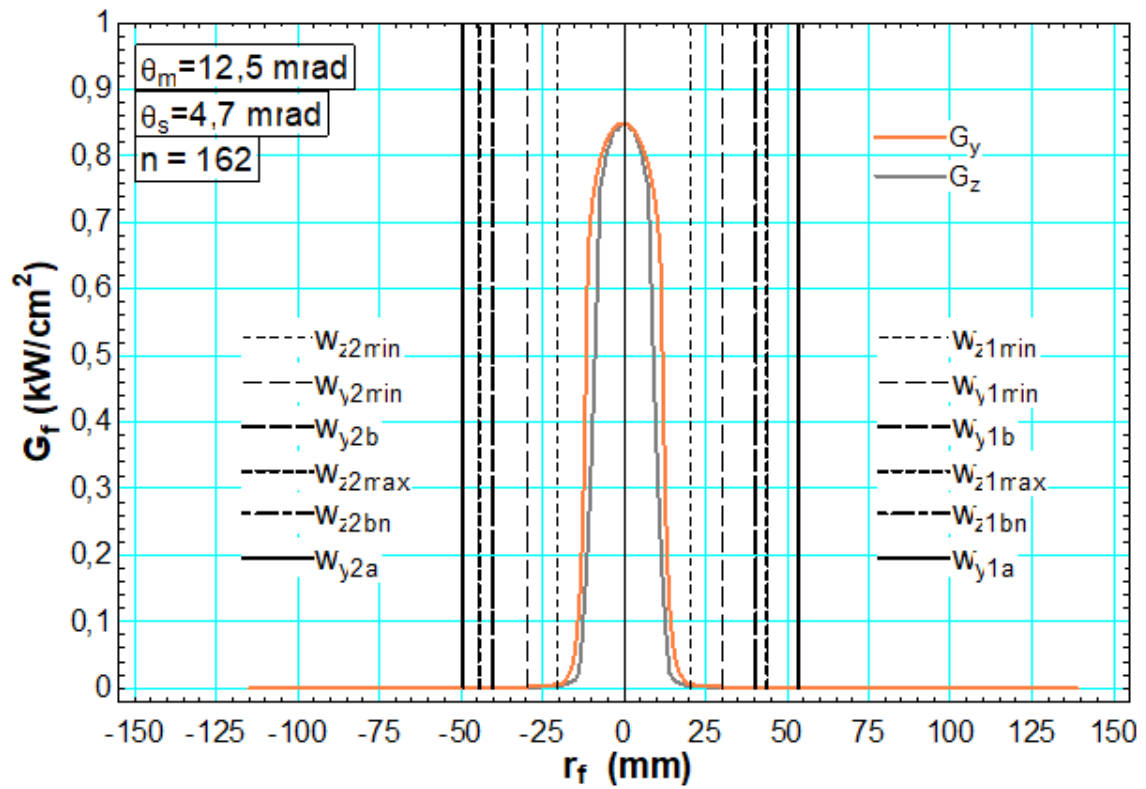


Figura C.6 – Imagens de Junho.

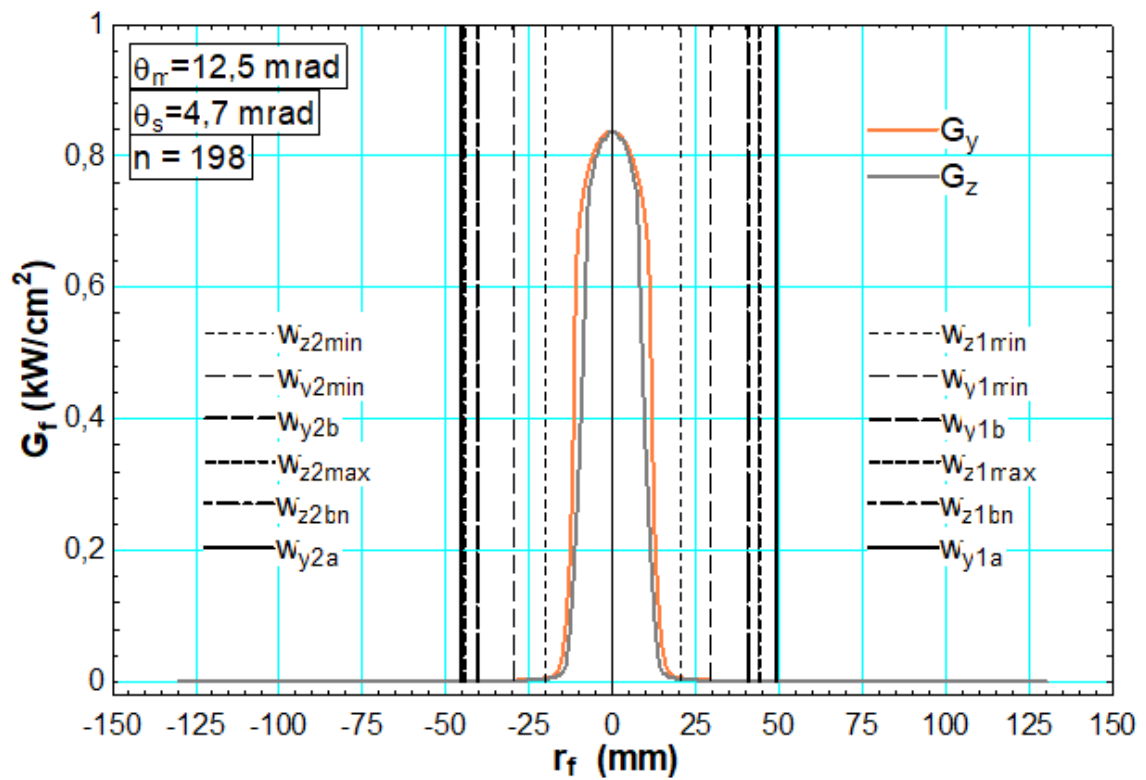


Figura C.7 – Imagens de Julho.

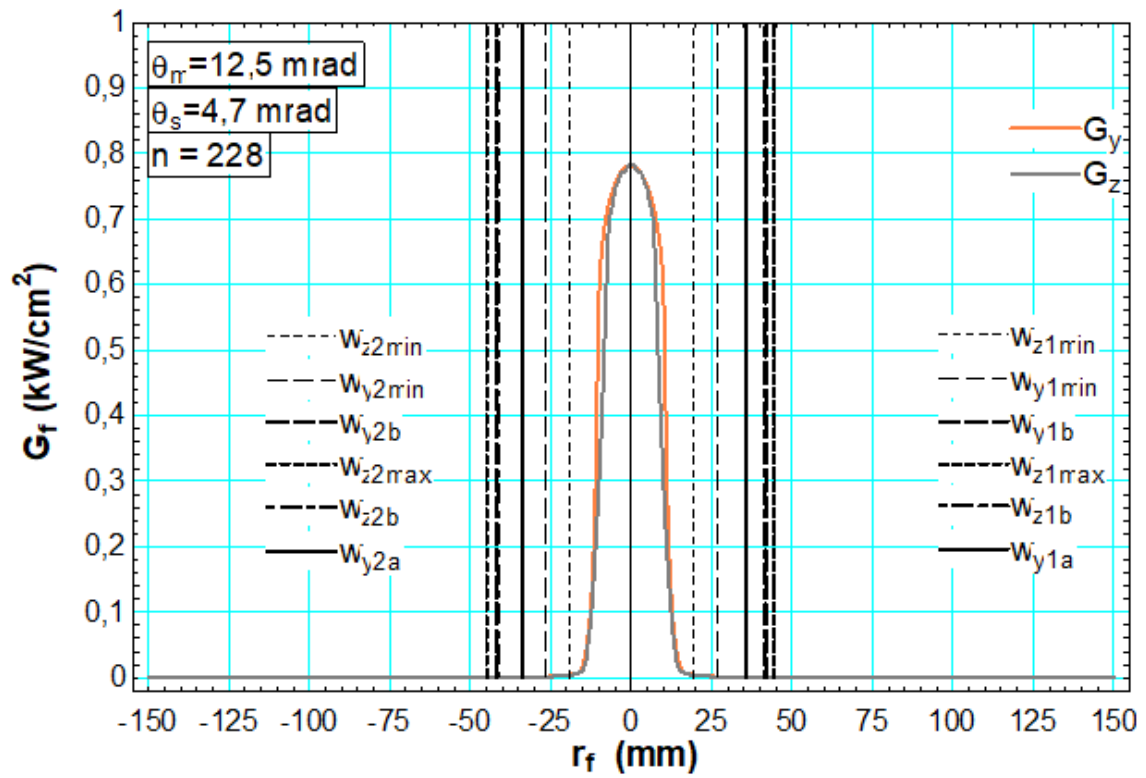


Figura C.8 – Imagens de Agosto.

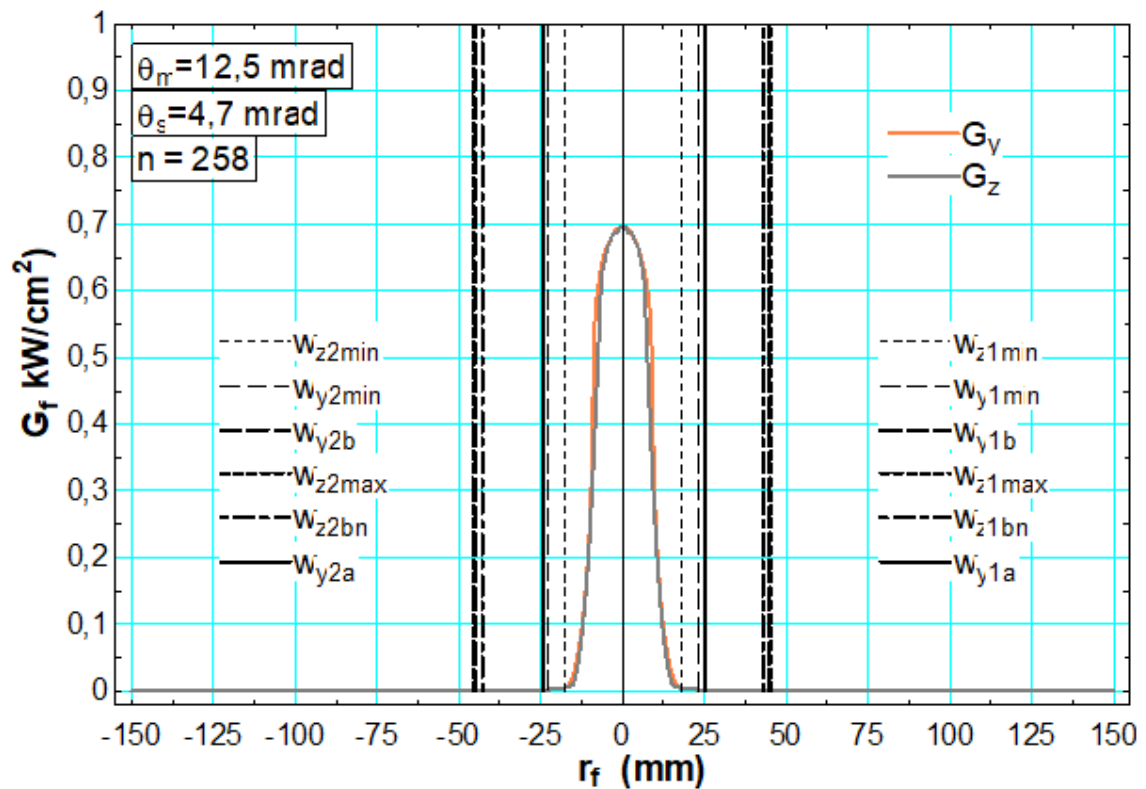


Figura C.9 – Imagens de Setembro.

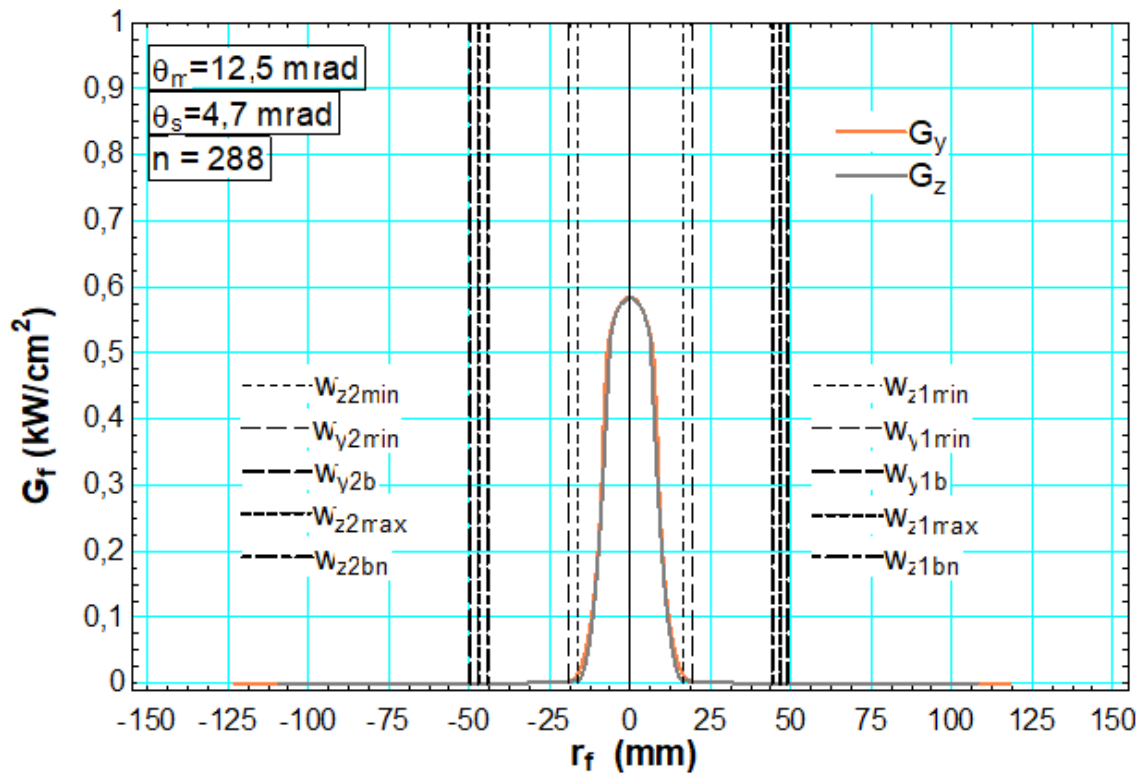


Figura C.10 – Imagens de Outubro.

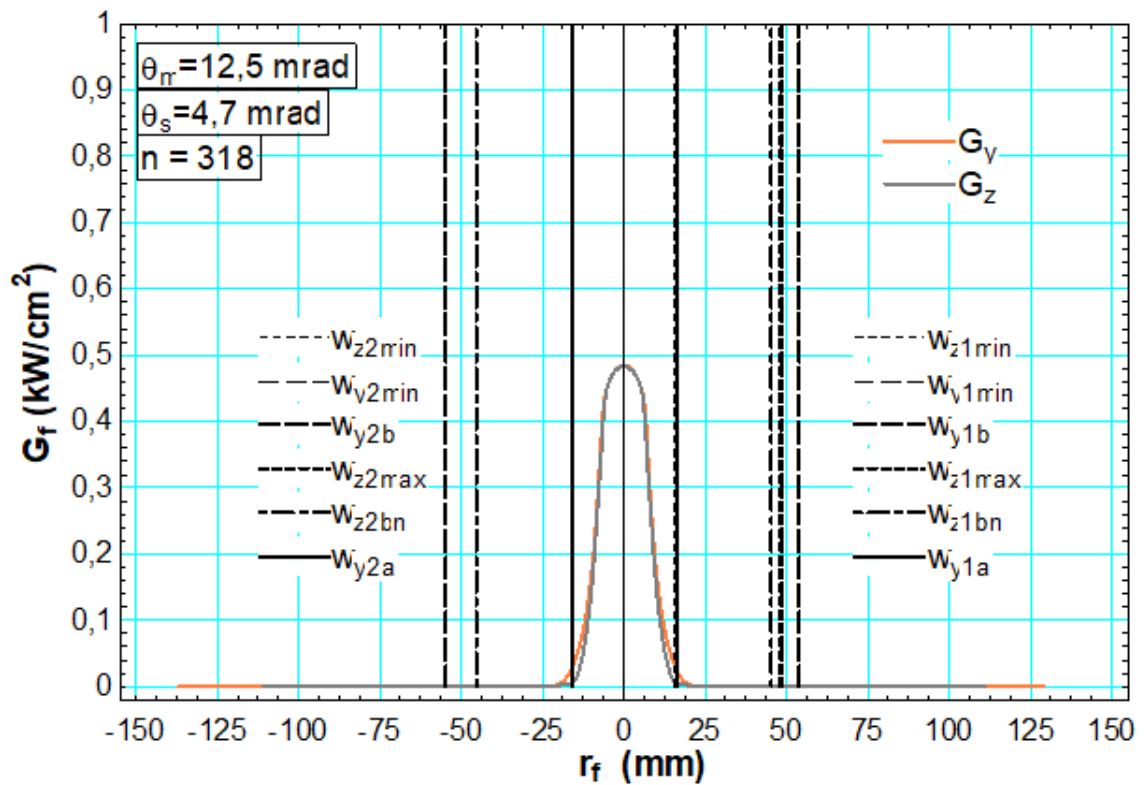


Figura C.11 – Imagens de Novembro.

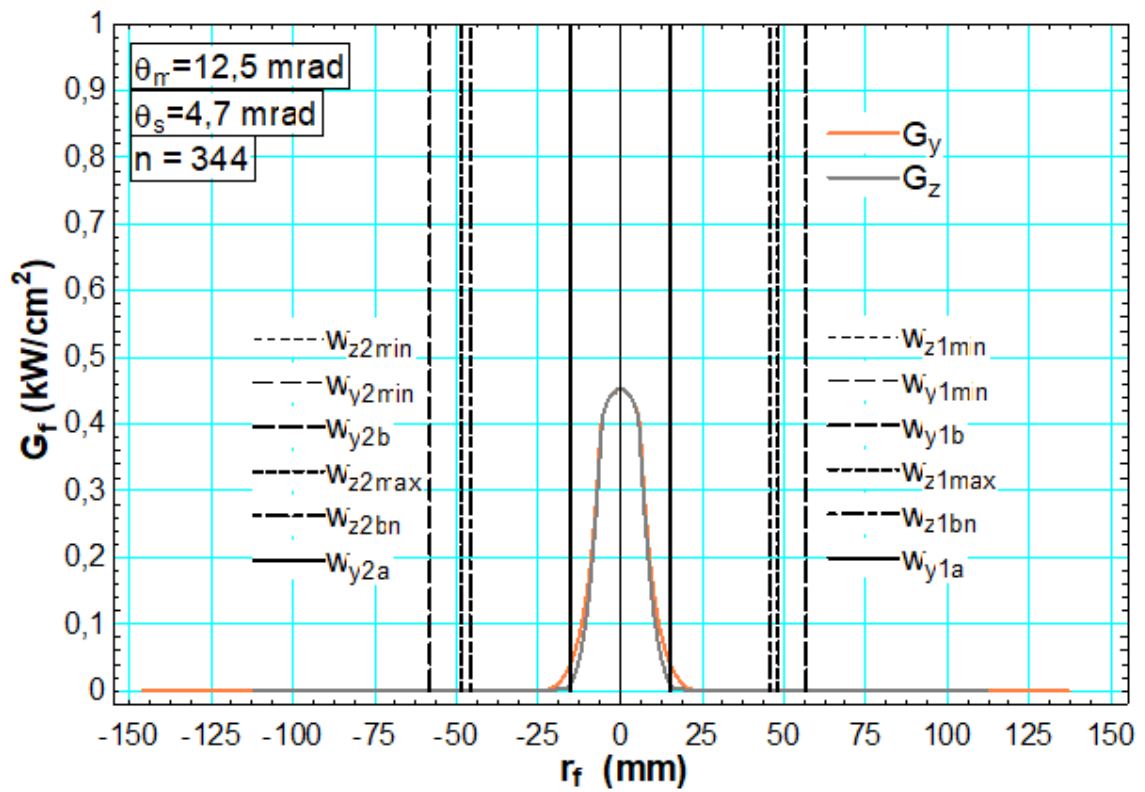


Figura C.12 – Imagens de Dezembro.

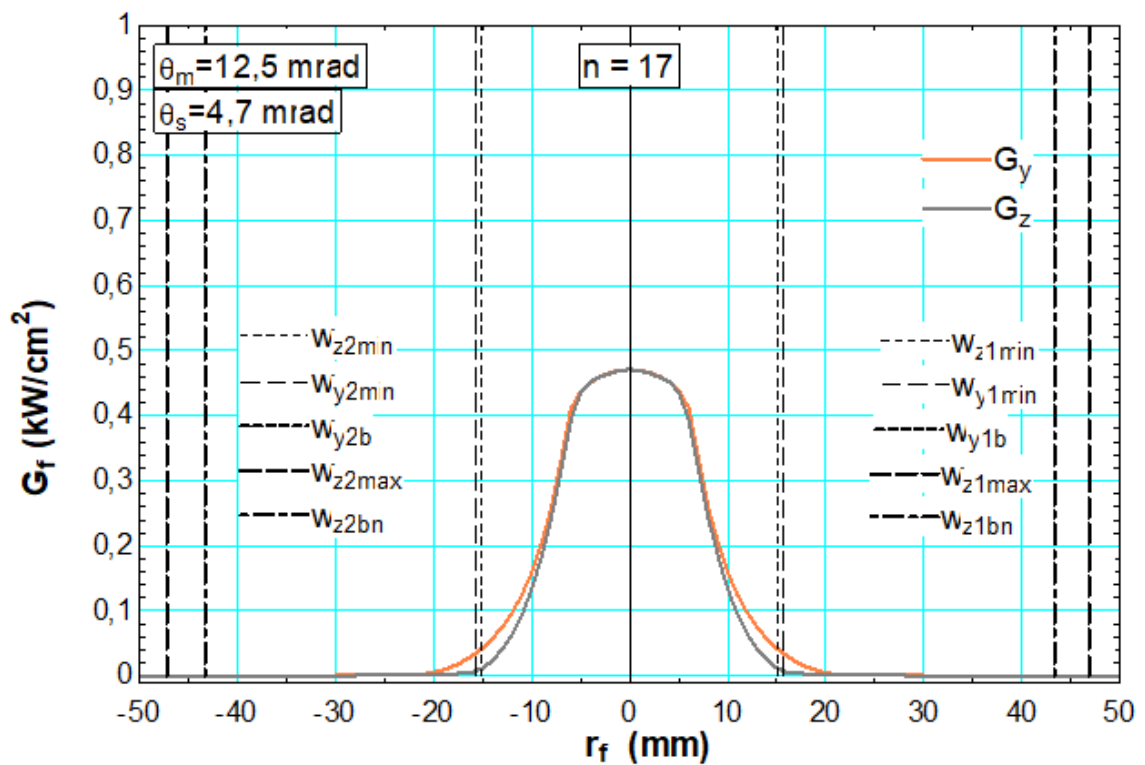


Figura C.13 – Núcleo de Janeiro.

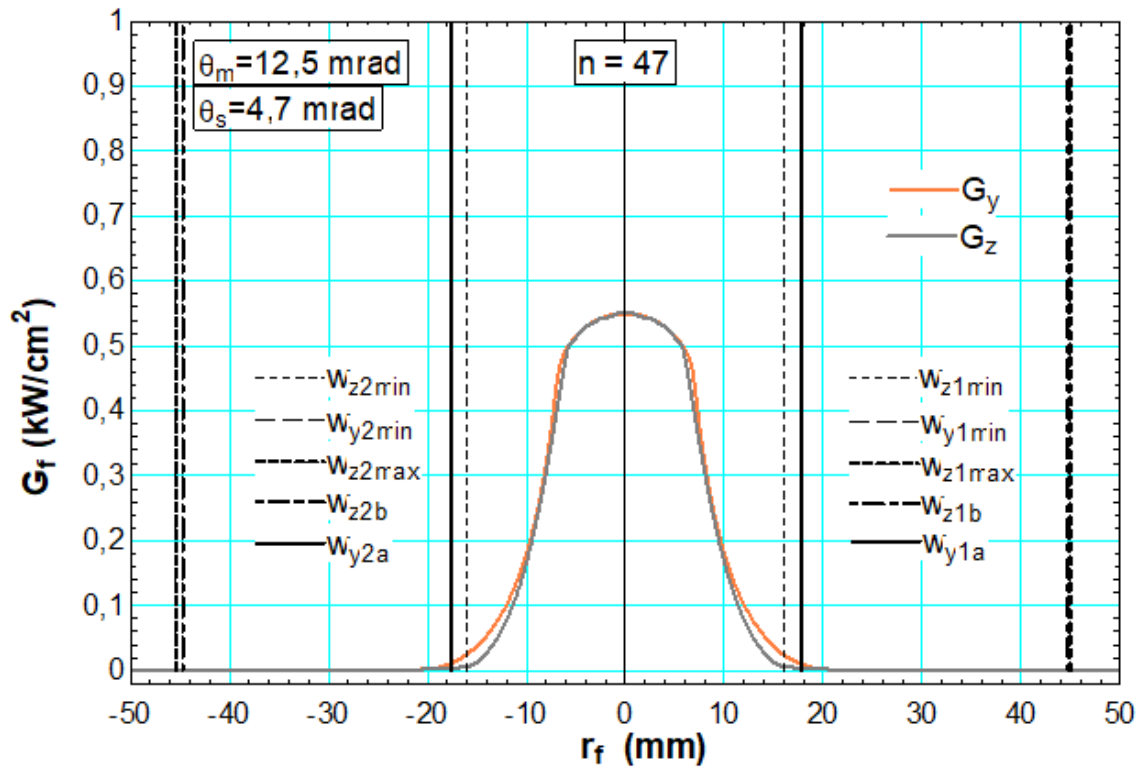


Figura C.14 – Núcleo de Fevereiro.

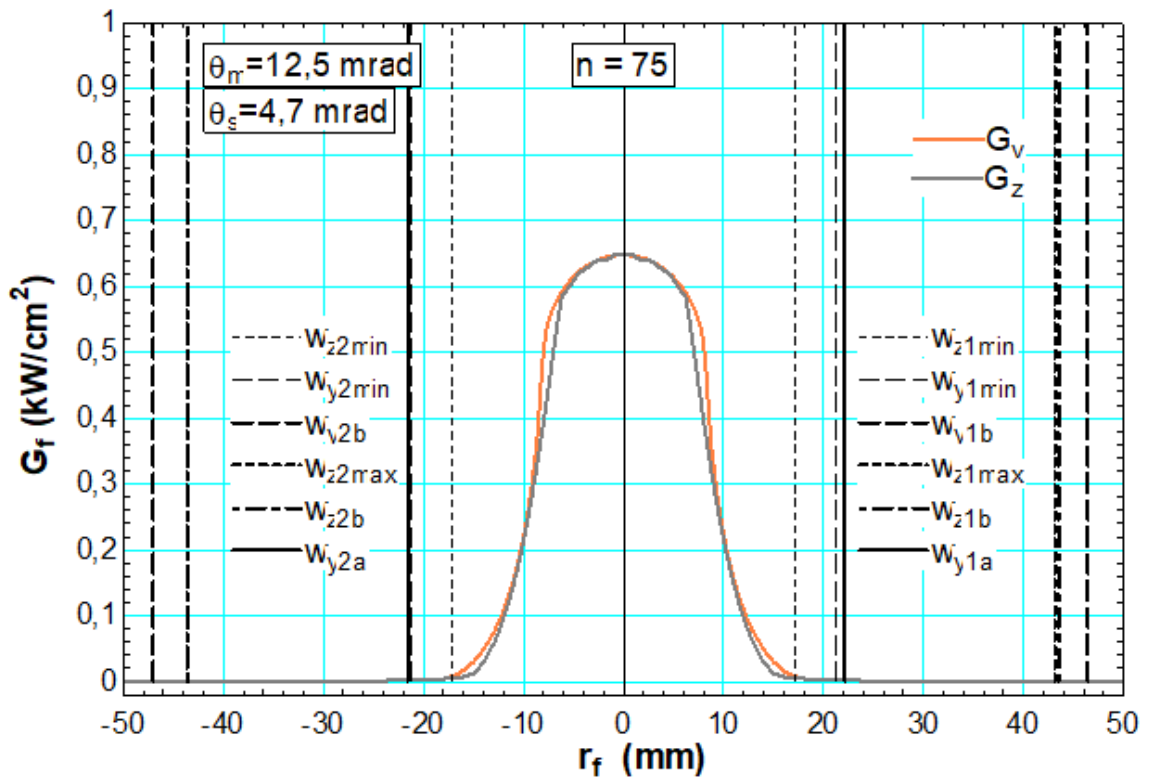


Figura C.15 – Núcleo de Março.

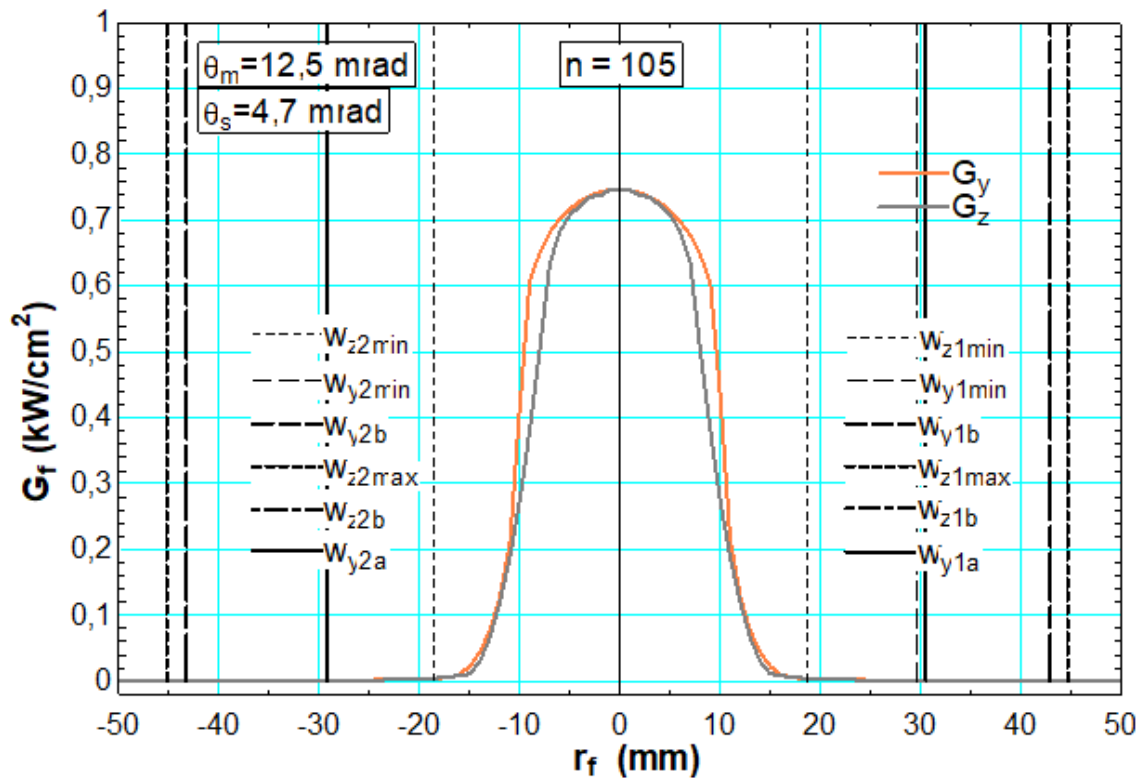


Figura C.16 – Núcleo de Abril.

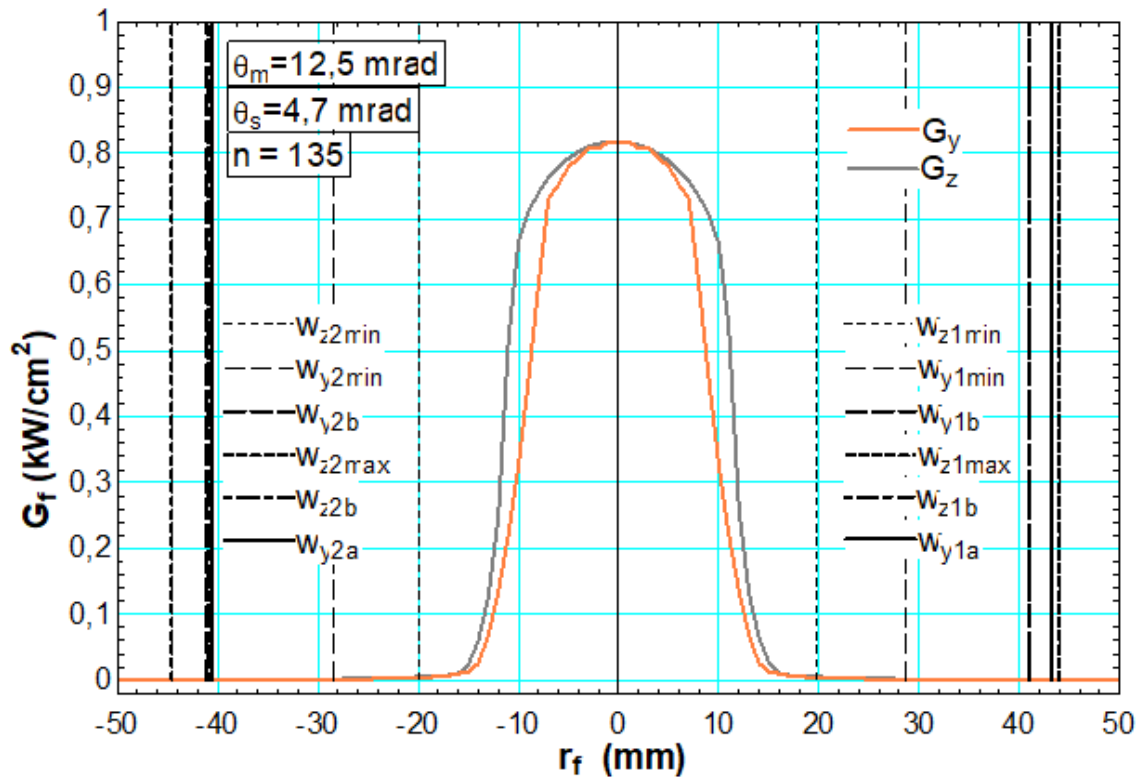


Figura C.17 – Núcleo de Maio.

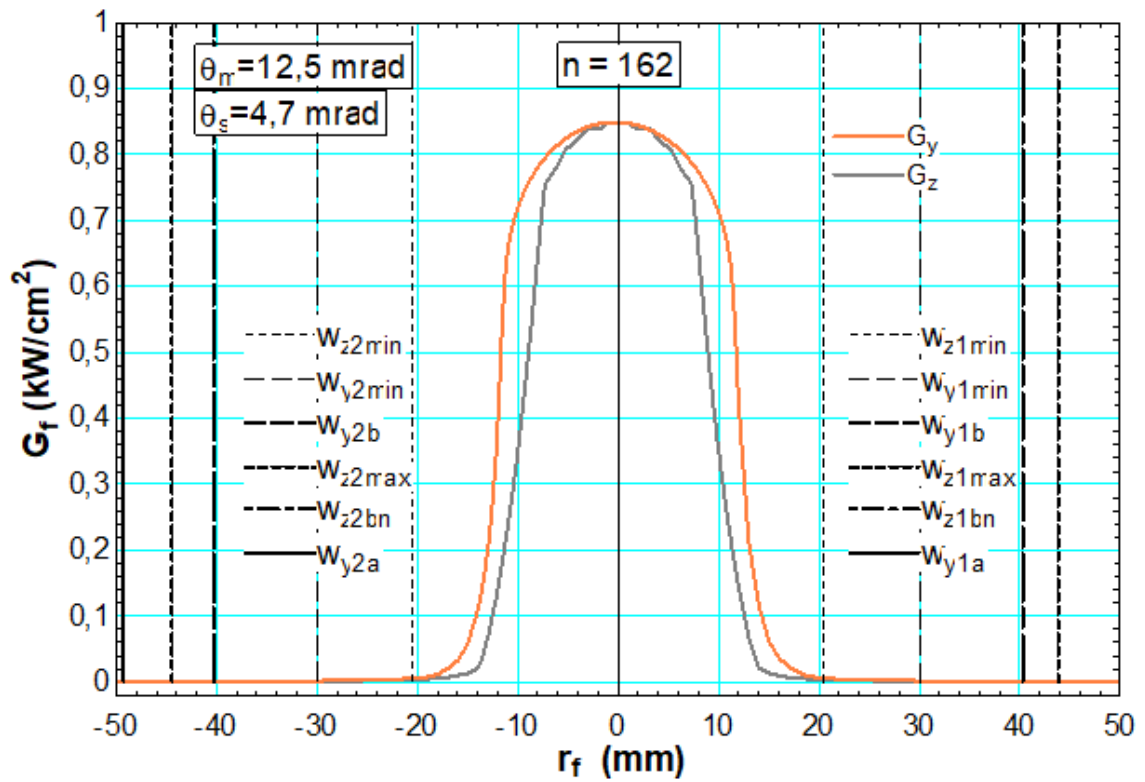


Figura C.18 – Núcleo de Junho.

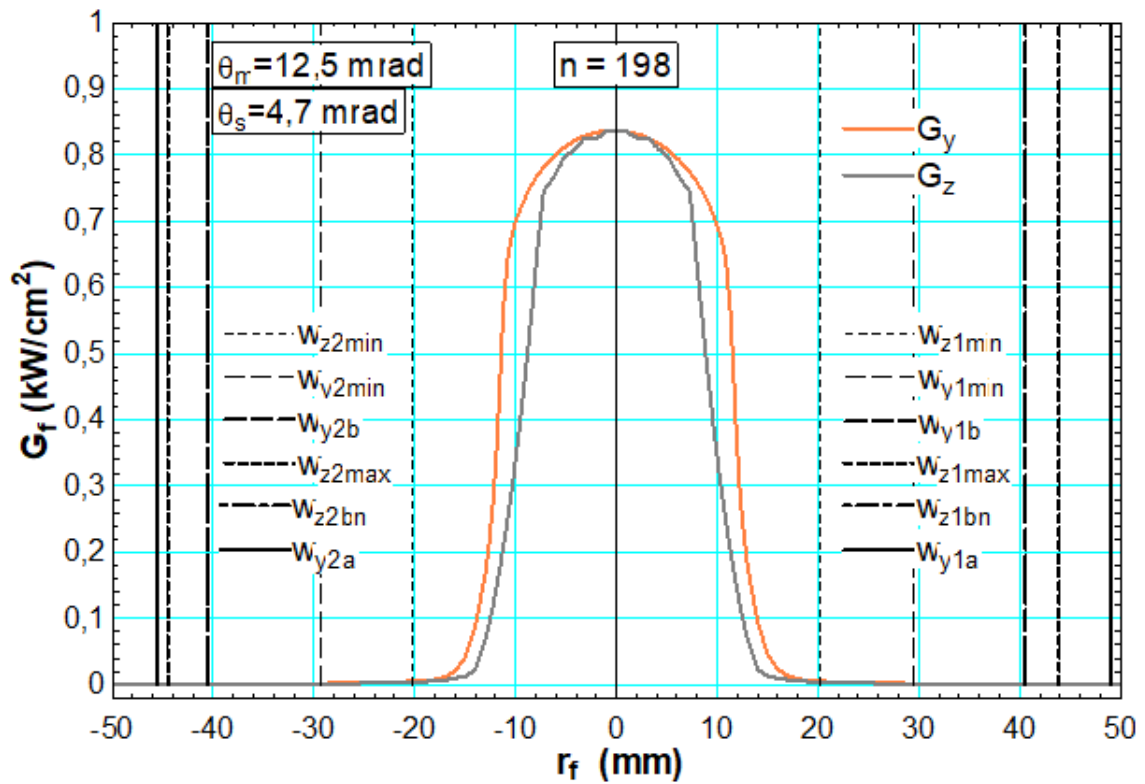


Figura C.19 – Núcleo de Julho.

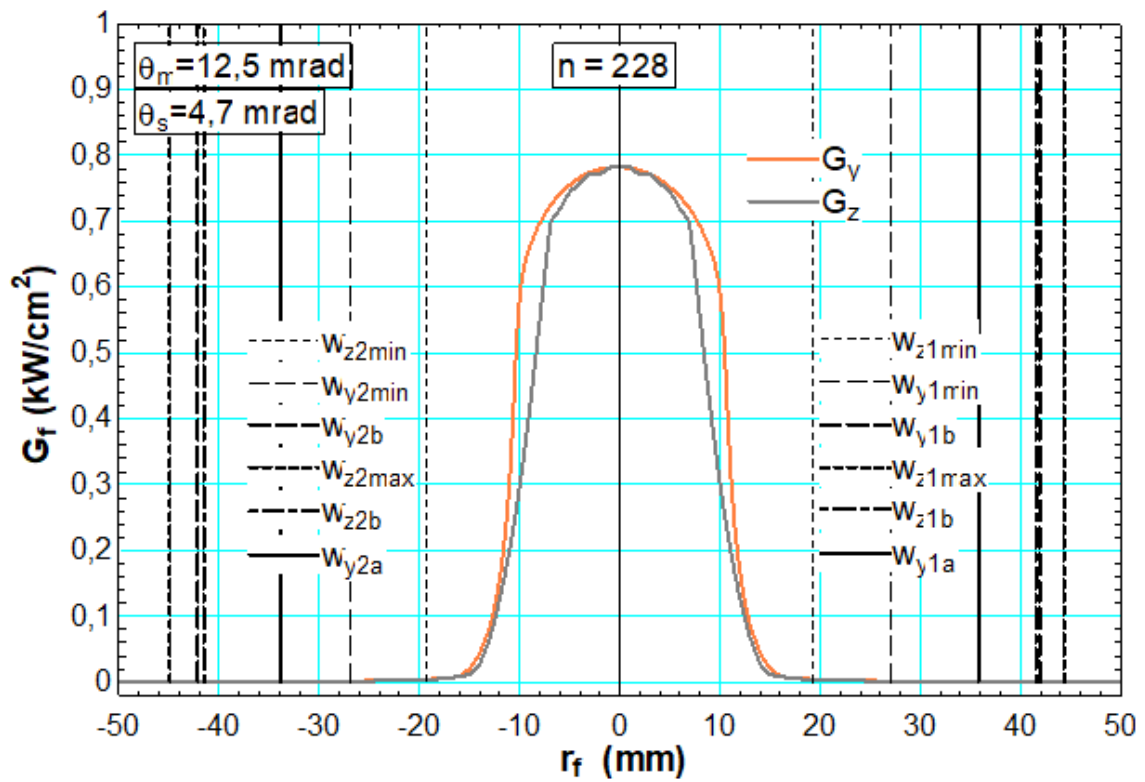


Figura C.20 – Núcleo de Agosto.

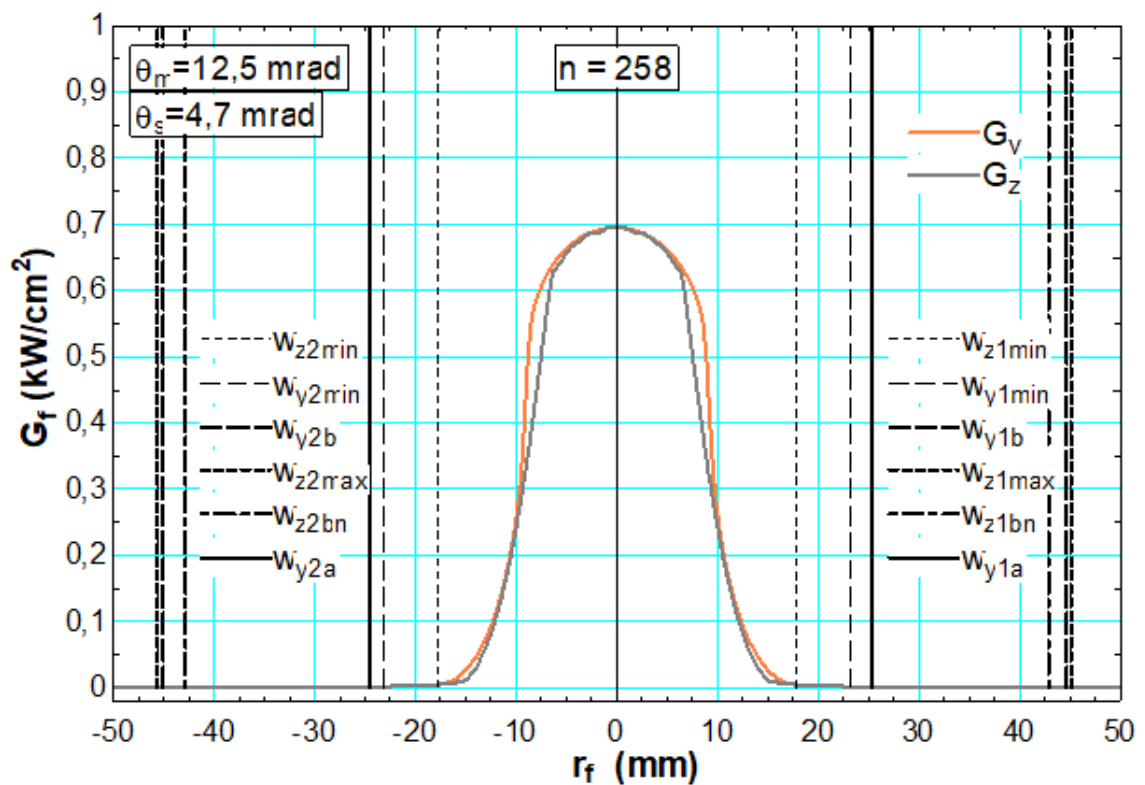


Figura C.21 – Núcleo de Setembro.

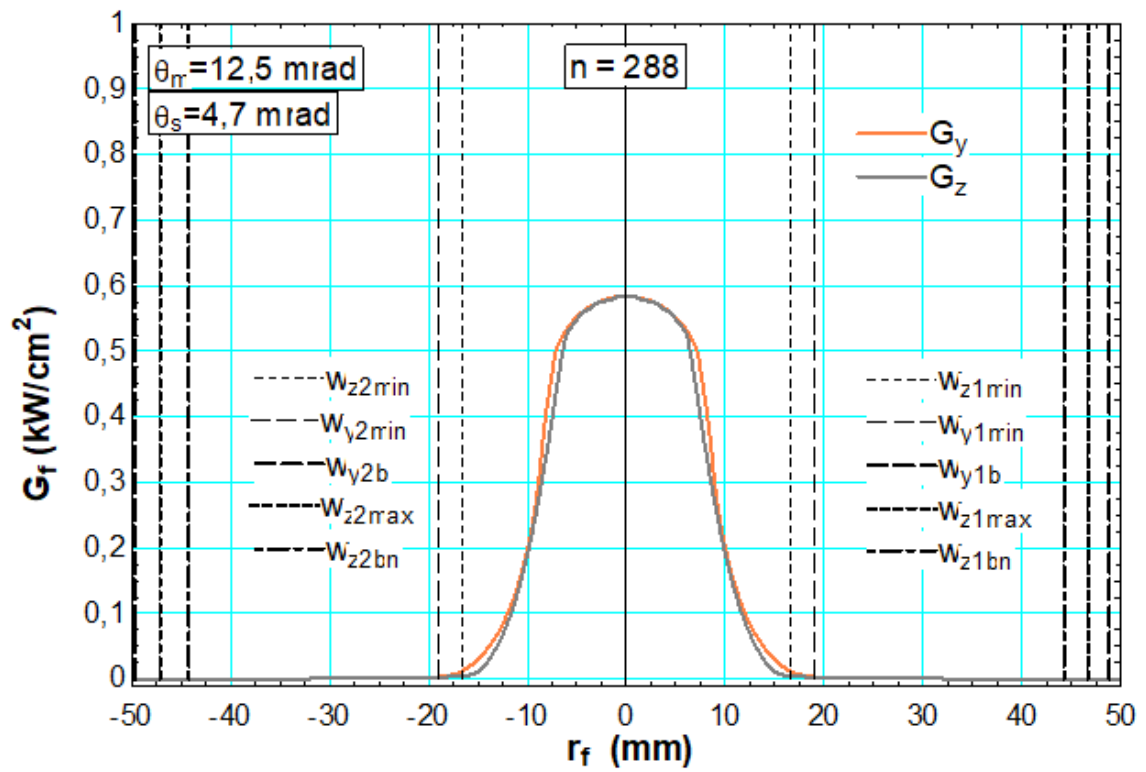


Figura C.22 – Núcleo de Outubro.

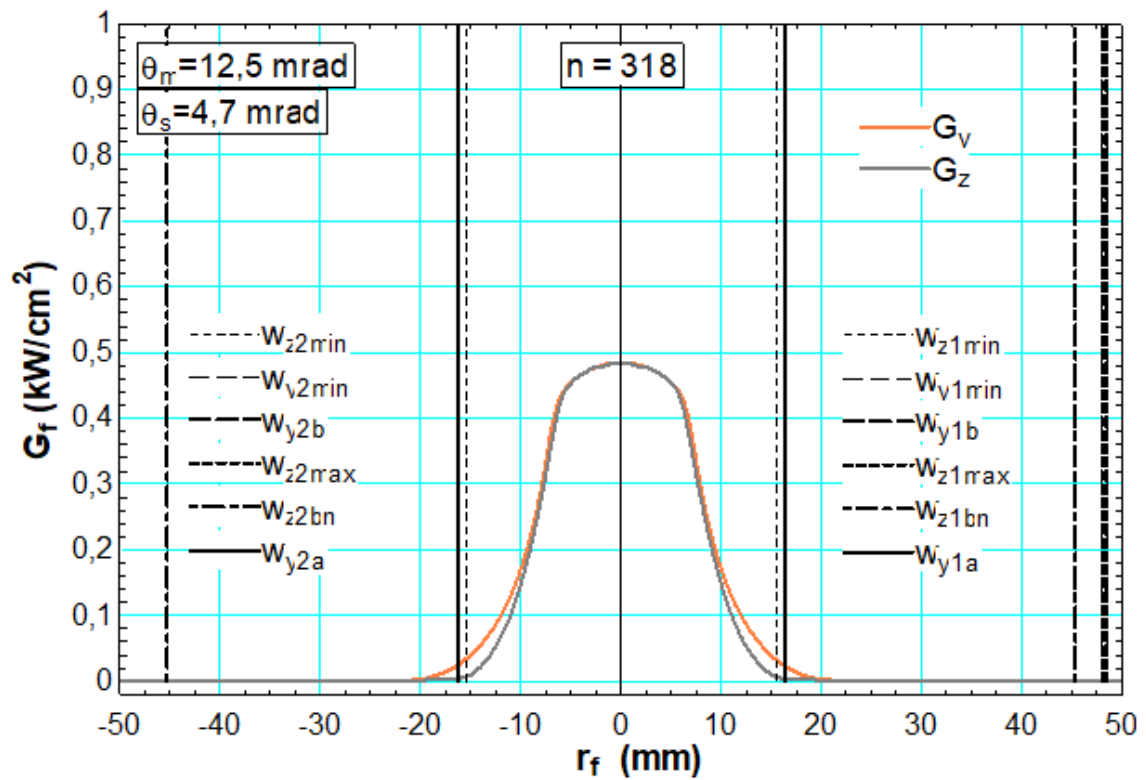


Figura C.23 – Núcleo de Novembro.

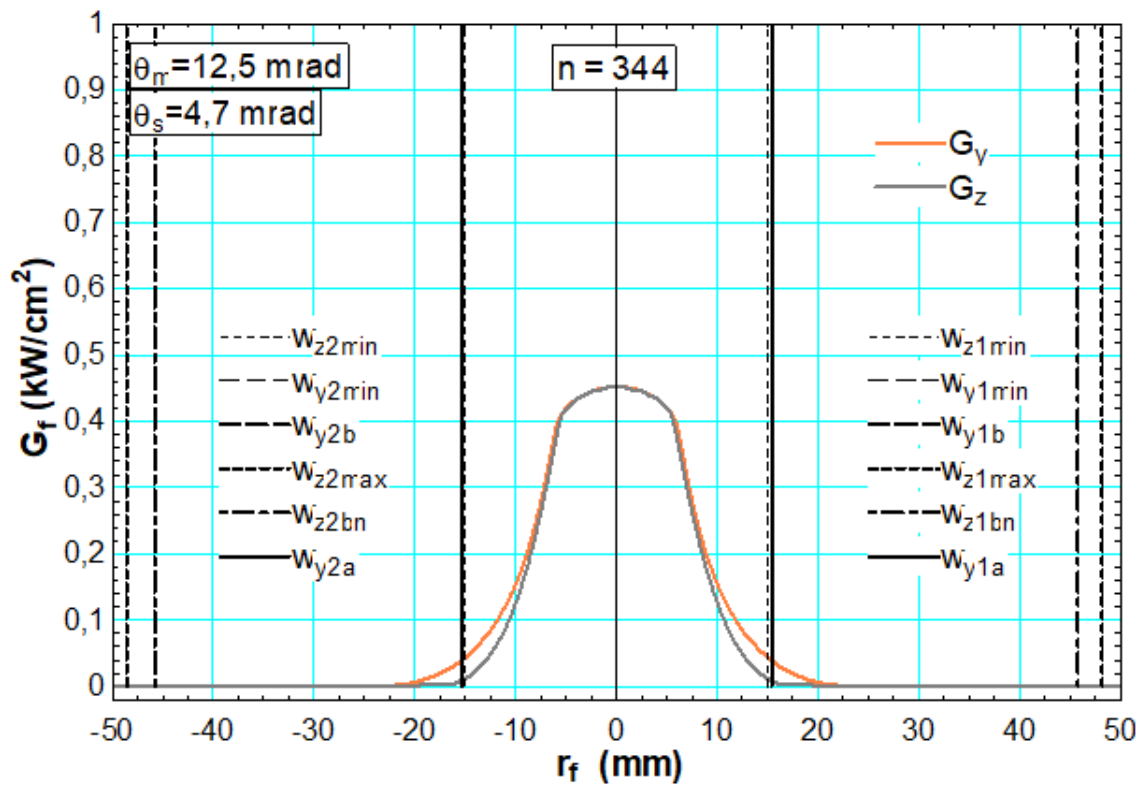


Figura C.24 – Núcleo de Dezembro.

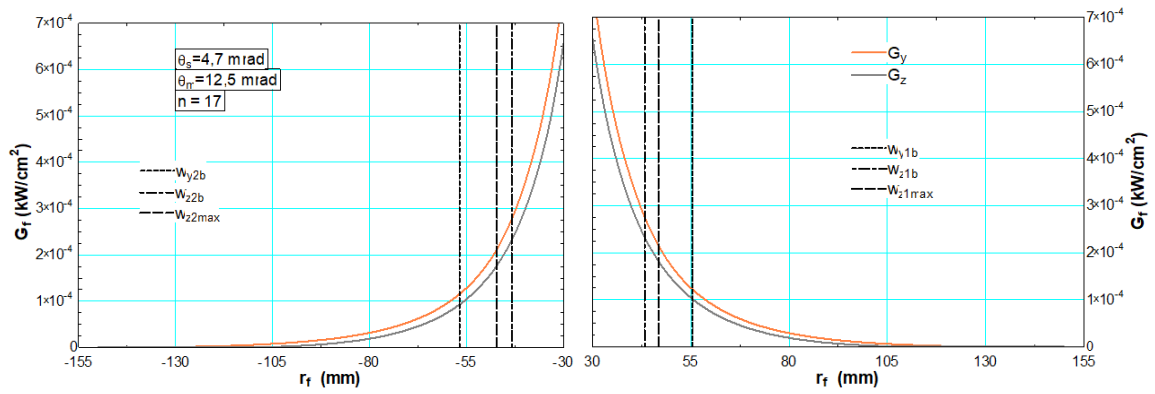


Figura C.25 – Janeiro

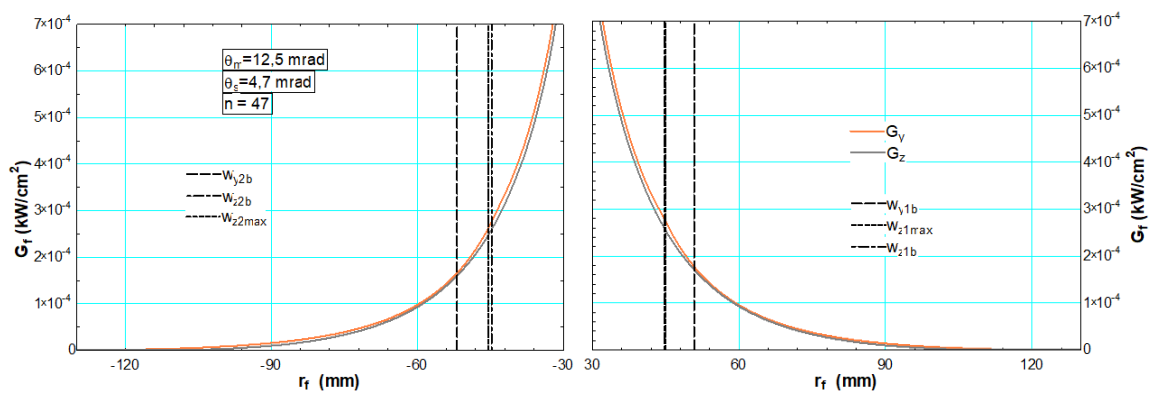


Figura C.26 – Fevereiro

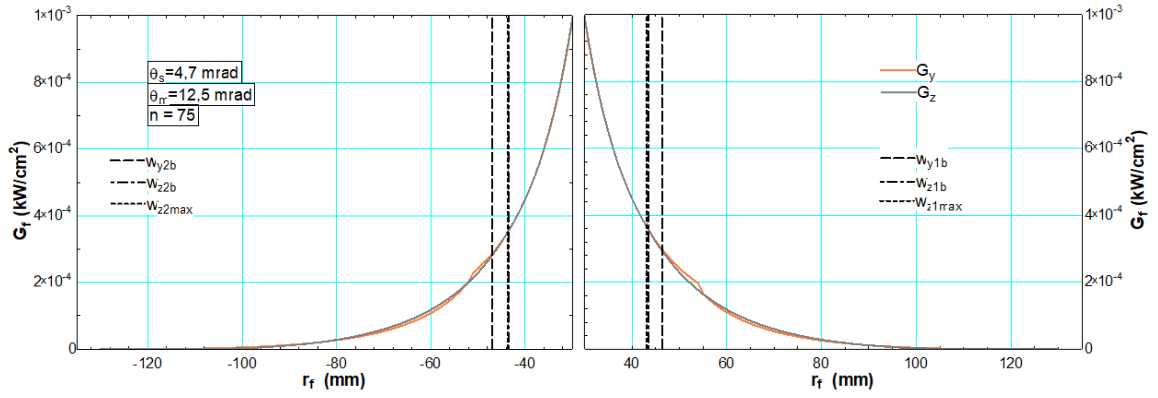


Figura C.27 – Março

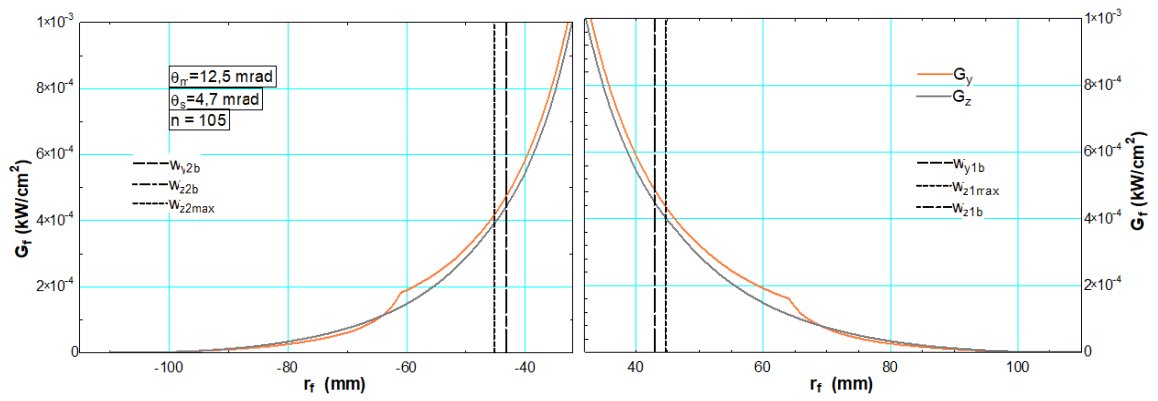


Figura C.28 – Abril

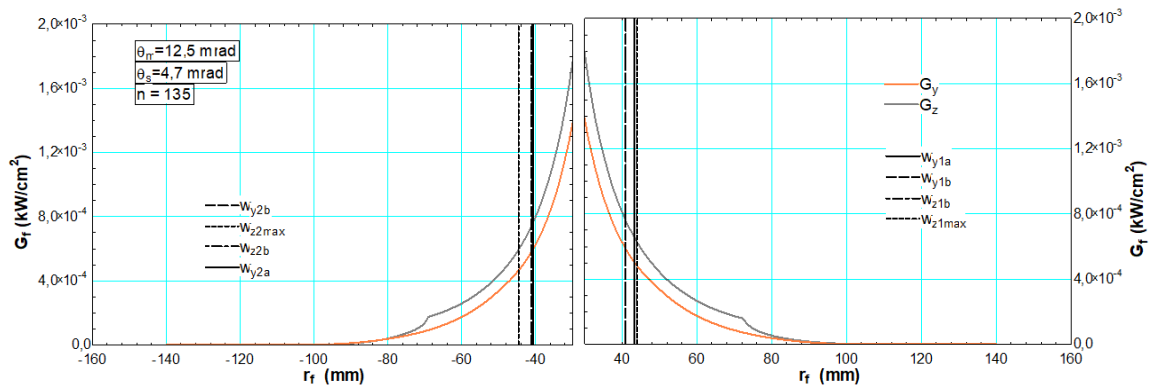


Figura C.29 – Maio

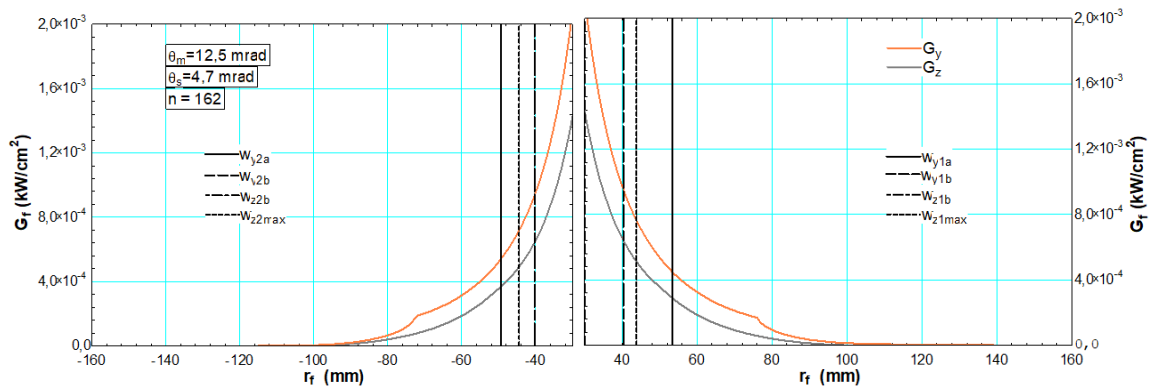


Figura C.30 – Junho

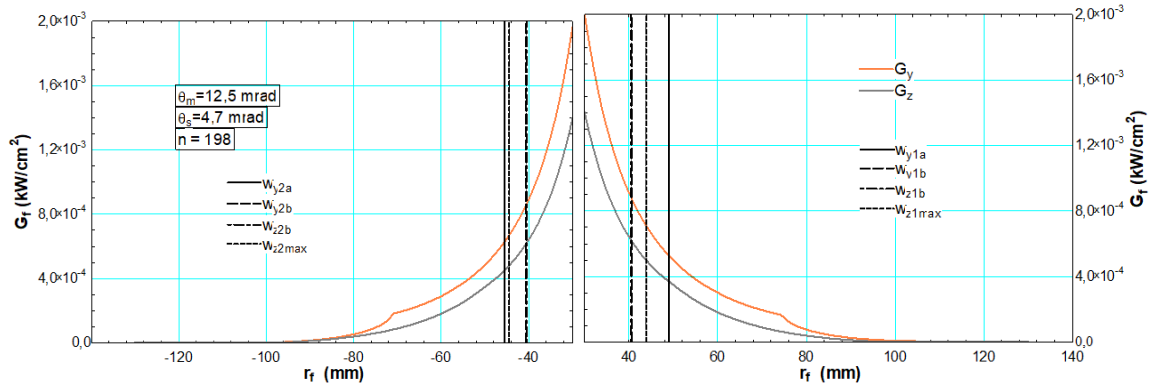


Figura C.31 – Julho

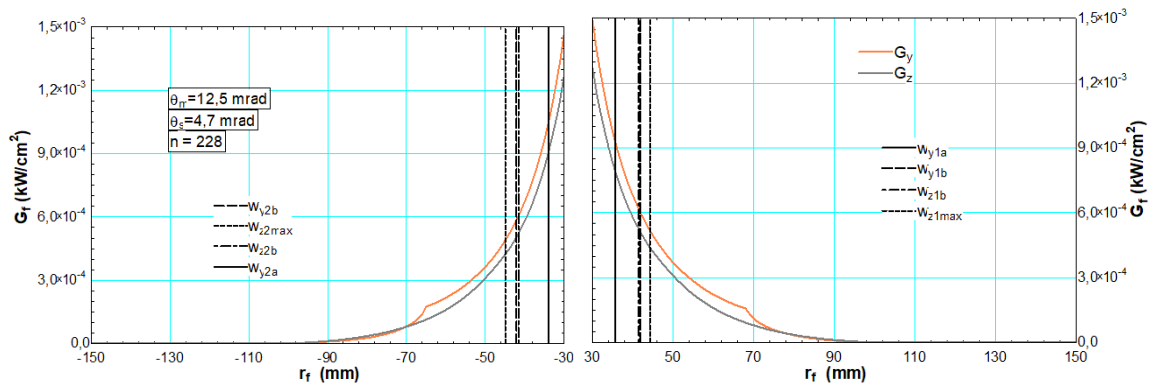


Figura C.32 – Agosto

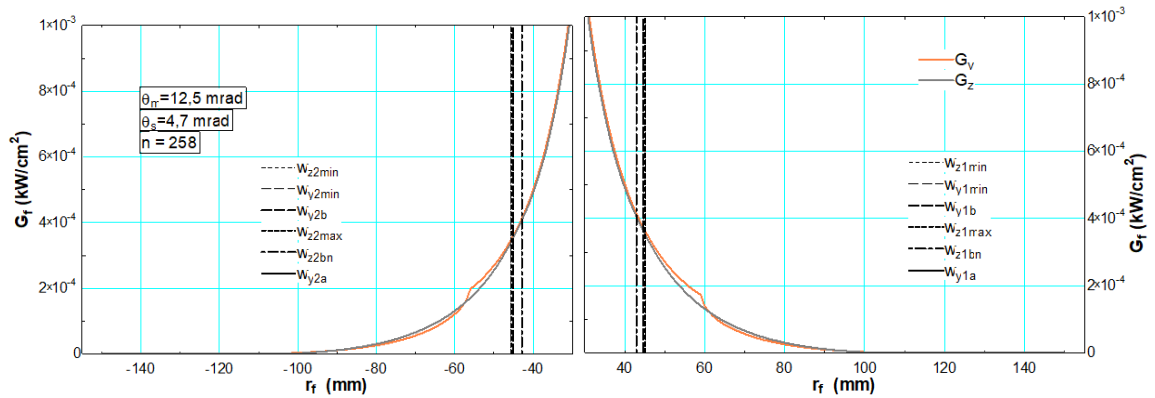


Figura C.33 – Setembro

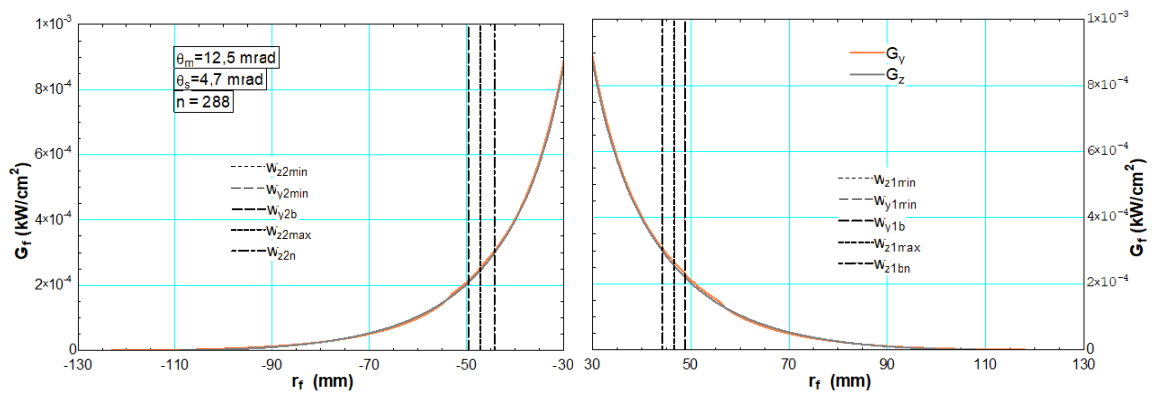


Figura C.34 – Outubro

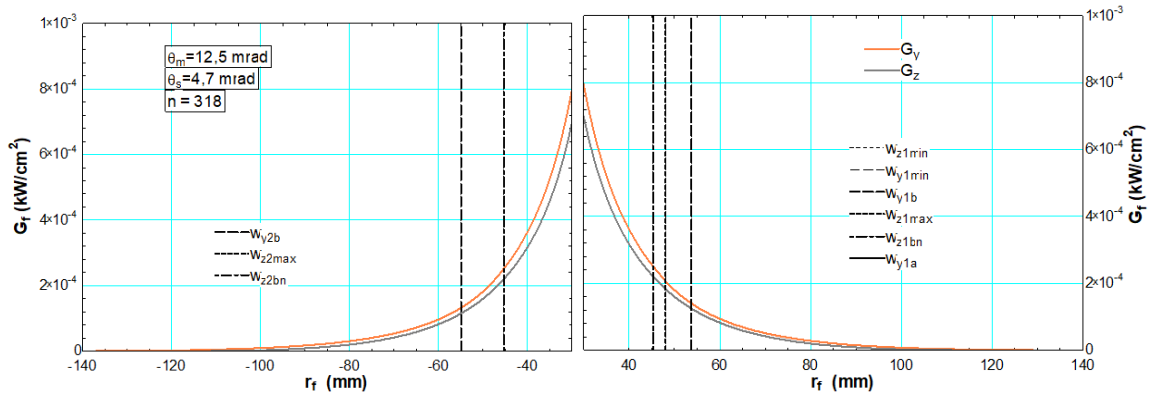


Figura C.35 – Novembro

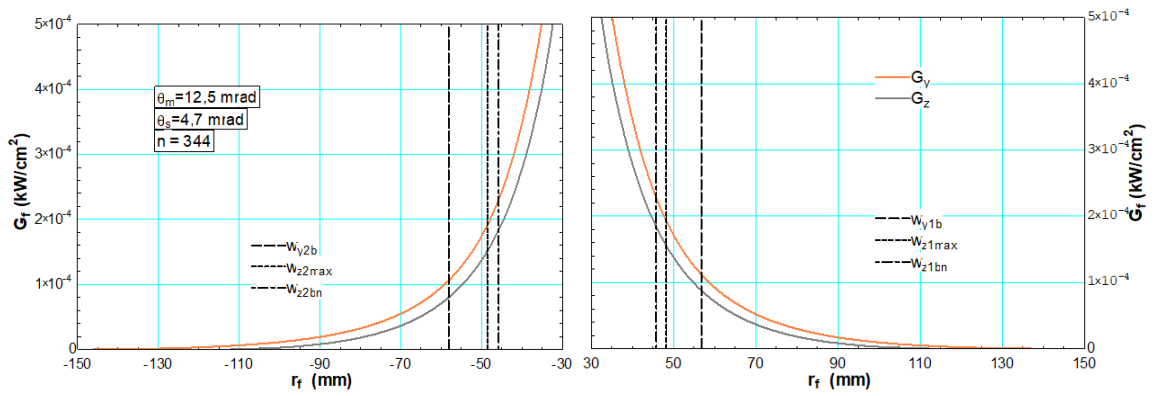


Figura C.36 – Dezembro

Anexos

ANEXO A – PERFIL MÉDIO DE EMISSÃO DE RADIAÇÃO A PARTIR DO DISCO SOLAR

Neumann et al. (2002) definem a proporção de radiação solar emitida pela auréola solar pela seguinte equação:

$$CSR = \frac{I_{CSR}}{I_{bT} - I_{CSR}} \quad (A.1)$$

onde I_{CSR} é a radiação incidente da auréola e, I_{bT} é a radiação medida por um pireliômetro.

A tabela A.1 fornece a proporção de cada curva CSR da Figura 2.40, cujos dados estão disponíveis na tabela A, e deve ser usada em função do I_{bT} medido.

Tabela A.1 – Ocorrência de CSR nas respectivas faixas de incidência solar direta no plano perpendicular (DNI) (NEUMANN et al., 2002).

CSR	Frequência em determinada faixa de DNI (%)					
	DNI (W/m ²)					
	0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000	1000-1200
CSR 0-4%	5,7	19,3	47,5	77,4	74,1	100,0
CSR 4-7%	0,0	6,8	9,3	12,4	22,8	0,0
CSR 7-15%	0,0	9,3	20,3	7,4	3,0	0,0
CSR 15-25%	2,9	21,1	18,3	2,7	0,1	0,0
CSR 25-35%	5,7	26,1	4,1	0,1	0,0	0,0
CSR >35%	85,7	17,4	0,6	0,0	0,0	0,0
Soma	100	100	100	100	100	100

Tabela A.2 – Perfil da emissão de radiação do disco e da auréola solar (I_r) com $\theta_s = 30$ mrad (NEUMANN et al., 2002).

θ'_s (mrad)	CSR 0	CSR 5	CSR 10	CSR 20	CSR 30	CSR 40	CSR
0	1,000E+00	1,000E+00	1,000E+00	1,000E+00	1,000E+00	1,000E+00	1,000E+00
0,4	9,989E-01	9,989E-01	9,991E-01	9,983E-01	9,987E-01	9,980E-01	9,989E-01
0,8	9,952E-01	9,950E-01	9,953E-01	9,933E-01	9,947E-01	9,934E-01	9,951E-01
1,2	9,887E-01	9,882E-01	9,882E-01	9,864E-01	9,875E-01	9,860E-01	9,884E-01
1,6	9,795E-01	9,782E-01	9,774E-01	9,758E-01	9,767E-01	9,738E-01	9,787E-01
2	9,672E-01	9,650E-01	9,639E-01	9,614E-01	9,612E-01	9,566E-01	9,659E-01
2,4	9,512E-01	9,474E-01	9,448E-01	9,435E-01	9,413E-01	9,344E-01	9,490E-01
2,8	9,306E-01	9,260E-01	9,209E-01	9,202E-01	9,158E-01	9,053E-01	9,276E-01
3,2	9,036E-01	8,976E-01	8,904E-01	8,887E-01	8,811E-01	8,667E-01	8,994E-01
3,6	8,663E-01	8,589E-01	8,501E-01	8,495E-01	8,388E-01	8,178E-01	8,611E-01
4	8,128E-01	8,020E-01	7,938E-01	7,930E-01	7,789E-01	7,537E-01	8,063E-01
4,1	7,945E-01	7,827E-01	7,753E-01	7,745E-01	7,601E-01	7,328E-01	7,877E-01
4,2	7,728E-01	7,595E-01	7,526E-01	7,526E-01	7,375E-01	7,113E-01	7,657E-01
4,3	7,456E-01	7,288E-01	7,256E-01	7,258E-01	7,106E-01	6,822E-01	7,380E-01
4,4	7,069E-01	6,834E-01	6,875E-01	6,856E-01	6,719E-01	6,435E-01	6,982E-01
4,6	5,017E-01	4,432E-01	4,868E-01	4,978E-01	5,020E-01	5,036E-01	4,917E-01
4,7	2,990E-01	2,528E-01	2,864E-01	3,205E-01	3,635E-01	4,007E-01	2,966E-01
4,8	1,201E-01	1,109E-01	1,311E-01	1,818E-01	2,433E-01	3,046E-01	1,307E-01
4,9	3,881E-02	4,710E-02	6,868E-02	1,082E-01	1,689E-01	2,420E-01	5,456E-02
5	1,527E-02	2,586E-02	4,939E-02	8,394E-02	1,378E-01	2,072E-01	3,116E-02
5,2	4,947E-03	1,566E-02	3,896E-02	7,112E-02	1,150E-01	1,786E-01	1,993E-02
5,3	3,702E-03	1,385E-02	3,633E-02	6,749E-02	1,084E-01	1,696E-01	1,803E-02
5,4	2,933E-03	1,259E-02	3,425E-02	6,460E-02	1,031E-01	1,617E-01	1,667E-02
5,5	2,439E-03	1,157E-02	3,238E-02	6,192E-02	9,803E-02	1,545E-01	1,559E-02
5,6	2,049E-03	1,075E-02	3,074E-02	5,938E-02	9,376E-02	1,478E-01	1,467E-02
5,8	1,519E-03	9,434E-03	2,780E-02	5,482E-02	8,572E-02	1,355E-01	1,313E-02
5,9	1,332E-03	8,884E-03	2,651E-02	5,279E-02	8,226E-02	1,301E-01	1,249E-02
6	1,163E-03	8,398E-03	2,525E-02	5,087E-02	7,891E-02	1,249E-01	1,188E-02
6,1	1,032E-03	7,948E-03	2,415E-02	4,905E-02	7,585E-02	1,201E-01	1,135E-02
6,2	8,989E-04	7,536E-03	2,303E-02	4,737E-02	7,296E-02	1,152E-01	1,082E-02
6,4	7,200E-04	6,846E-03	2,111E-02	4,404E-02	6,765E-02	1,068E-01	9,926E-03
6,5	6,582E-04	6,525E-03	2,023E-02	4,259E-02	6,514E-02	1,029E-01	9,526E-03
6,6	5,875E-04	6,222E-03	1,942E-02	4,114E-02	6,293E-02	9,924E-02	9,145E-03
6,7	5,269E-04	5,960E-03	1,863E-02	3,974E-02	6,073E-02	9,564E-02	8,782E-03
6,8	4,813E-04	5,704E-03	1,787E-02	3,839E-02	5,853E-02	9,244E-02	8,445E-03
7	4,107E-04	5,231E-03	1,645E-02	3,596E-02	5,461E-02	8,631E-02	7,832E-03
8,6	2,666E-04	3,021E-03	9,227E-03	2,189E-02	3,320E-02	5,264E-02	4,697E-03
10,2	1,402E-04	1,884E-03	5,499E-03	1,387E-02	2,148E-02	3,435E-02	2,964E-03
11,9	8,533E-05	1,281E-03	3,382E-03	9,028E-03	1,447E-02	2,306E-02	1,949E-03
13,5	4,181E-05	9,464E-04	2,313E-03	6,272E-03	1,047E-02	1,649E-02	1,371E-03
15,2	4,275E-05	7,139E-04	1,640E-03	4,411E-03	7,739E-03	1,208E-02	1,003E-03
16,8	3,437E-05	5,838E-04	1,230E-03	3,264E-03	6,009E-03	9,220E-03	7,683E-04
18,5	2,718E-05	4,792E-04	9,447E-04	2,415E-03	4,701E-03	7,065E-03	5,923E-04

Continua ▼

Tabela A.2 – (Continuação)

θ'_s (mrad)	CSR 0	CSR 5	CSR 10	CSR 20	CSR 30	CSR 40	$\overline{\text{CSR}}$
20,1	2,229E-05	3,986E-04	7,499E-04	1,857E-03	3,789E-03	5,613E-03	4,718E-04
21,7	1,106E-05	3,345E-04	6,052E-04	1,439E-03	3,122E-03	4,558E-03	3,772E-04
23,4	1,306E-05	2,863E-04	4,993E-04	1,123E-03	2,541E-03	3,694E-03	3,094E-04
25	7,857E-06	2,333E-04	4,074E-04	9,118E-04	2,108E-03	2,954E-03	2,496E-04
26,7	9,148E-06	2,023E-04	3,407E-04	7,460E-04	1,776E-03	2,451E-03	2,105E-04
28,3	5,041E-06	1,804E-04	2,971E-04	6,331E-04	1,508E-03	2,079E-03	1,787E-04
30	8,865E-06	1,777E-04	2,577E-04	5,520E-04	1,248E-03	1,705E-03	1,573E-04

■

ANEXO B – INFORMAÇÕES DO ESPELHO DA ALANOD

Esta seção apresenta os dados fornecidos pelo fabricante dos espelhos utilizados neste trabalho. O fabricante é a ALANOD®, e o modelo utilizado é o **MIRO-SUN® weather-proof reflective 90**. A Figura B.1 apresenta um esquema das camadas que constituem o material reflexivo. O substrato é alumínio anodizado em ambos os lados. Na parte traseira, há uma camada de proteção Epóxi. Na frente, que é o lado da reflexão, há o tratamento superficial que, de acordo com Alanod-Solar (2010), garante a reflexão global de 95% seguida de uma camada de proteção com verniz orgânico. A figura B.2 apresenta uma análise em que foi medida a reflexão em diferentes ângulos de incidência da radiação solar: 10°, 40°, 55° e 70°. A figura B.3, apresenta a mesma análise somente para a reflexão para as bandas de luz visível.

A tabela B.1 apresenta informações sobre resultados de testes realizados pela ALANOD® no espelho **MIRO-SUN® weather-proof reflective 90**, e a tabela B.2 apresenta características físico-químicas do espelho segundo o fabricante Alanod-Solar (2010), Alanod-Solar (2014).

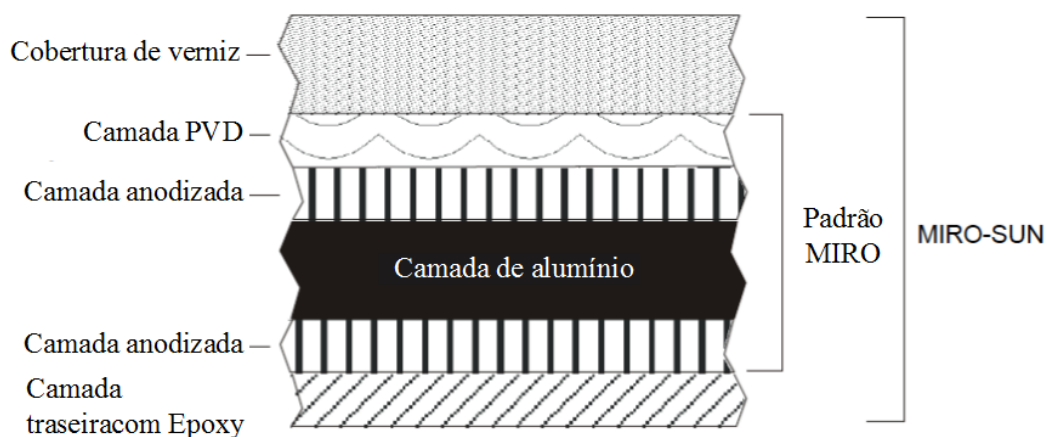


Figura B.1 – Estrutura do espelho de alumínio anodizado. Fonte: Alanod-Solar (2010).

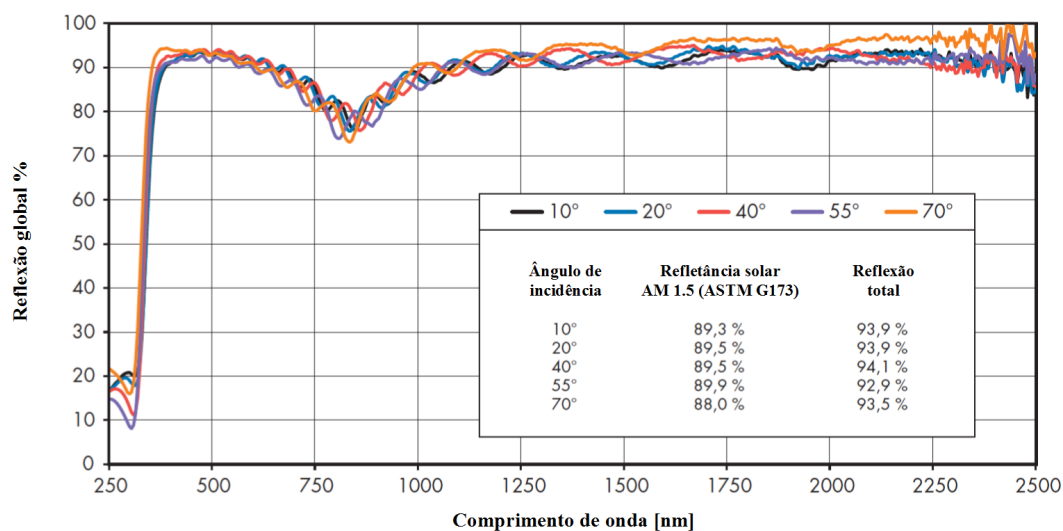


Figura B.2 – Reflexão no espectro total da radiação solar. Fonte: Alanod-Solar (2014).

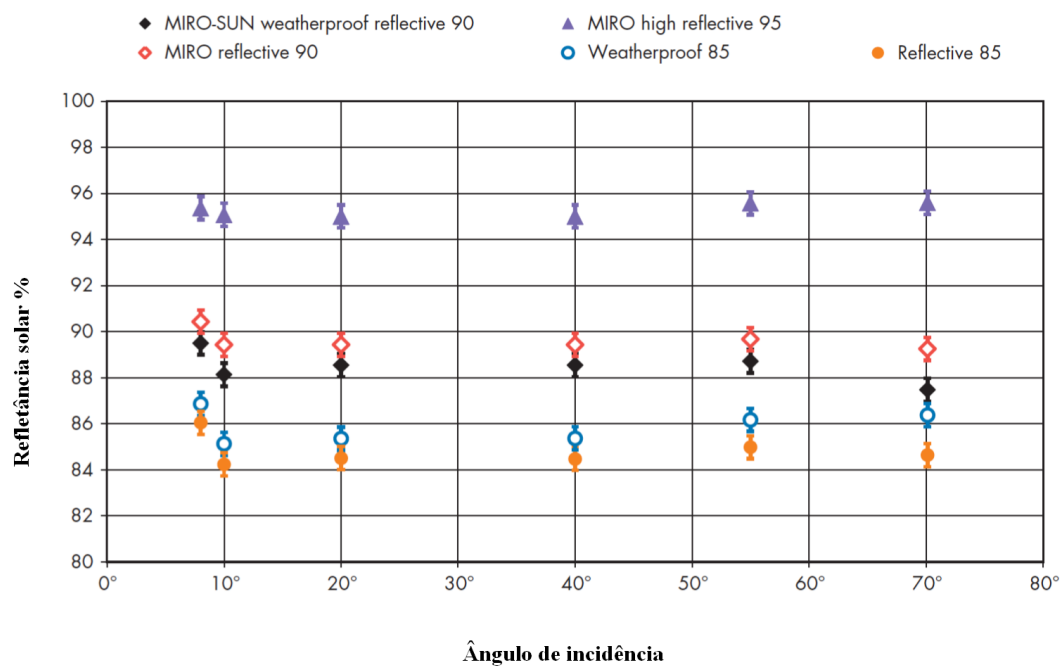


Figura B.3 – Reflexão no espectro visível da radiação solar. Fonte: Alanod-Solar (2014).

Tabela B.1 – Resultados de análises ópticas, segundo Alanod-Solar (2010).

Medição	Metodologia	Resultado
Reflexão da iluminação global / 8°	DIN 5036-3 (U-Kugel)	≥ 93,5%
Reflexão da iluminação difusa / 8°	DIN 5036-3 (U-Kugel)	≤ 10,0%
Reflexão da iluminação global / 30°	ASTM E-1651 (TR-2)	≤ 93,0%
Brilho a 30° de incidência paralela à direção da laminação. Luz incidente <2°	ASTM E-430 (Hunter Dorigon)	≥ 87,0%
Brilho a 30° de incidência perpendicular à direção da laminação. Luz incidente <2°	ASTM E-430 (Hunter Dorigon)	≥ 85,0%
Brilho a 20°. Luz incidente a 10°	ISO 7668 (Dr Lange)	≥ 88,0%
Brilho a 60°. Luz incidente a 10°	ISO 7668 (Dr Lange)	≥ 88,0%
Espectro luminoso global da reflexão	DIN 5033 (Minolta)	≥ 93,5%
Reflexão da luz solar (10°)	AM 1.5 ISO	≥ 88,5%

Tabela B.2 – Características físico-químicas do espelho **MIRO-SUN[®] weather-proof reflective 90**. Alanod-Solar (2014).

Propriedades	Parâmetros	MIRO-SUN[®] weather-proof reflective 90	Norma
Mecânica	Resistência à tração:	130 - 160	EN 485-2
	Tensão de escoamento:	125 - 155	EN 485-2
	Alongamento A $\geq 50\%$:	≥ 2	EN 485-2
	Raio de dobra:	≥ 2 espessura de dobra	
Ótica	Reflexão solar global %:	90	ASTM G 173
	Refletância solar especular ponderada (R_{solar}^s %):	≥ 84	ASTM G 173
	Refletância solar difusa ponderada	$\sim 5 - 6\%$	ASTM G 173
	Refletância da luz visível:	$\geq 87\%$	DIN 5036-3
	Refletância especular:	86 / 86	ISO 7668 60°
	Ângulo total/meio de refletância solar especular ponderada:	25/ $\pm 12,5$ mrad	•
Física	Densidade [g/cm ³]:	2,7	
	Coefficiente de expansão térmica [$10^6 / K^{-1}$]:	23,5	
	Resistência térmica:	200°C	
	Condutividade térmica [W / m · K]:	≥ 220	
Dimensionais	Largura da chapa [mm]:	1250	
	Comprimento da chapa [mm]:	2000	
	Espessura da chapa [mm]:	0,5	