



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E  
NUCLEARES

LEONARDO FAUSTINO LACERDA DE SOUZA

**CONCENTRADOR LINEAR FRESNEL APLANÁTICO**

Recife

2022

LEONARDO FAUSTINO LACERDA DE SOUZA

**CONCENTRADOR LINEAR FRESNEL APLANÁTICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares.

**Área de concentração:** Fontes Renováveis de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Chigueru Tiba.

Coorientador: Prof. Dr. Naum Fraidenraich.

Recife

2022

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| S729c | <p>Souza, Leonardo Faustino Lacerda de.<br/>Concentrador linear fresnel aplanático / Leonardo Faustino Lacerda de Souza. – 2022.<br/>114 f.: il., figs., abrev. e siglas.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Chigueru Tiba.<br/>Coorientador: Prof. Dr. Naum Fraidenraich.<br/>Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Recife, 2022.<br/>Inclui referências e apêndices.</p> <p>1. Energia nuclear. 2. Aplanático. 3. Linear Fresnel. 4. Concentrador solar.<br/>I. Tiba, Chigueru (Orientador). II. Fraidenraich, Naum (Coorientador). III. Título.</p> <p>UFPE</p> <p>621.042 CDD (22. ed.)</p> <p>BCTG/2022-266</p> |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

LEONARDO FAUSTINO LACERDA DE SOUZA

**CONCENTRADOR LINEAR FRESNEL APLANÁTICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de concentração: Fontes Renováveis de Energia.

Aprovada em: 30/06/2022.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Naum Fraidenraich (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. José Bione de Melo Filho (Examinador Externo)  
Companhia Hidroelétrica do São Francisco

---

Profa. Dra. Olga de Castro Vilela (Examinadora Interna)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Emerson Tôrres Aguiar Gomes (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho (Examinador Externo)  
Instituto Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, fonte da verdadeira e infinita bondade, pela condução dos meus passos, e por todas as oportunidades postas no meu caminho ao longo da vida.

A José Geraldo e Idalva, meus pais, minhas inspirações morais, donos do meu mais puro amor. Obrigado por todo suporte e pela compreensão nos meus momentos de ausência.

Aos meus irmãos Daniel e Rafaela, orgulhos da minha vida, meus exemplos de vida acadêmica. Obrigado por compartilhar experiências, visando sempre a evolução conjunta, rumo à excelência intelectual.

Ao meu orientador Naum pela dedicação e brilhantismo, determinantes para a execução deste trabalho. Obrigado também pelos ensinamentos que foram além da engenharia de energia solar e, com certeza, transformaram meu modo de encarar a vida acadêmica e pessoal.

Ao meu orientador Tiba por todas as orientações, conselhos e oportunidades dadas ao longo do doutorado. Serei eternamente grato pelas portas que me foram abertas e pelas pessoas que me foram apresentadas durante este período.

Ao prof. Jeffrey Gordon pelo apoio na elaboração dos artigos e nos ensinamentos que levarei daqui para frente sobre um modo moderno de fazer pesquisa.

Aos membros do meu comitê de acompanhamento Olga, Emerson e Manoel. Obrigado pelas orientações extremamente pertinentes nas várias etapas do doutorado, que, sem dúvidas, elevaram o nível deste trabalho.

A João, Douglas, Gustavo, Geovane, Keiller e Victor, meus parceiros fiéis de luta durante estes intensos quatro anos. Obrigado por acreditarem sempre em mim, ajudando-me nos momentos de angústia, seja trazendo uma palavra amiga, seja trazendo alívio e contentamento à minha mente.

Aos amigos para toda a vida que a UFAL me deu Amanda, Alana, Igor, Sara e Michelle. Obrigado pelo compartilhamento de experiências, pelo incentivo, por todo o suporte dado e pelos momentos de alegria e companheirismo.

Aos amigos que fiz em virtude do doutorado Jhone, Juciela, Ayrton, Carol e July. Obrigado pelos excelentes momentos na rota Maceió-Recife. As viagens e estadias em Recife foram mais felizes porque vocês estavam comigo.

A todas as pessoas que passaram pela minha vida e contribuíram, mesmo que minimamente, para o meu enriquecimento pessoal, profissional e espiritual.

## RESUMO

O concentrador linear Fresnel aplanático (CLFA) é descrito como um novo projeto óptico adequado às usinas de termelétricas solares. O projeto final é composto por espelhos primários cilíndricos e um conjunto secundário/absorvedor totalmente estacionário. Mostrou-se que ele é capaz de atingir os altos fatores de interceptação das calhas parabólicas convencionais em alta concentração, enquanto oferece os benefícios práticos e de baixo custo dos concentradores lineares Fresnel. Por exemplo, projetos práticos de CLFA atingiram fatores de interceptação tão altos quanto 0,84 em valores de concentração de aproximadamente 26. Uma metodologia para quantificar analiticamente as perdas inerentes não só ao concentrador proposto, mas a qualquer LFR, em função da variação do ângulo de incidência transversal e longitudinal foi desenvolvida. Com isto, todas as informações necessárias à análise completa do CLFA são fornecidas. O fator de interceptação transversal e longitudinal foi descrito, possibilitando a estimativa diária e anual de energia coletada. Uma equação de transformação que permite reduzir a área de perdas entre espelhos (perdas para o solo) é apresentada; quantifica-se também a região de perdas por bloqueio resultante desta transformação. As perdas para o solo, por sombreamento do concentrador secundário, bem como o sombreamento entre espelhos adjacentes, são quantificadas usando o conceito de frente de onda efetiva, que estima a quantidade de energia que ingressa na abertura do concentrador em função do ângulo de incidência. A análise das perdas por rejeição de raios e dispersão permitiu quantificar os raios refletidos pelos espelhos primários que: (1) não entram na abertura do secundário, ou que (2) entram na abertura secundária, mas não atingem o absorvedor. Considerando uma distribuição de brilho constante com semiângulo total de 9 mrad, a modelagem analítica das perdas validadas através de traçado de raios permitiu a avaliação de dois extremos de projeto: CLFA  $\{-1; -0,1\}$  com  $C = 50$  e  $\gamma(0,0) = 0,72$ , e CLFA  $\{-2,2; -0,03\}$  com  $C = 35$  e  $\gamma(0,0) = 0,84$ , este último obtendo melhor desempenho em função da variação do ângulo de incidência.

**Palavras-chave:** aplanático; linear Fresnel; concentrador solar.

## ABSTRACT

The linear aplanatic Fresnel concentrator was described as a new optical design suitable for solar thermal power plants. The final design is composed by cylindrical primary mirrors and a fully stationary secondary/absorber assembly. It has been shown to be able to achieve the high interception factors of conventional parabolic troughs at high concentration, while offering the practical, low-cost benefits of Fresnel linear concentrators. For example, practical designs have achieved interception factors as high as 0.84 at concentration values of approximately 26. A methodology to analytically quantify the losses inherent not only to the proposed concentrator, but to any LFR, as a function of transverse and longitudinal incidence angles was developed. With this, all the information necessary for the complete analysis of the CLFA is provided. The transverse and longitudinal intercept factor was described, allowing the daily and annual estimate of collected energy. A transformation equation that allows to reduce the losses between mirrors (ground losses) is presented; the region of blocking losses resulting from this transformation is quantified. The ground losses, secondary shading losses, as well as the shading between adjacent mirrors, are quantified using the effective wavefront concept, which estimates the amount of energy entering the concentrator aperture. The analysis of ray rejection and dispersion losses allowed us to quantify the rays reflected by the primary mirrors that (a) do not enter the secondary aperture, or that (b) enter the secondary aperture, but are not absorbed. Considering a pillbox brightness distribution with 9mrad, analytical modeling of losses validated through ray tracing allowed the evaluation of two design extremes: CLFA  $\{-1; -0.1\}$  with  $C = 50$  e  $\gamma(0,0) = 0,72$ , and CLFA  $\{-2.2; -0.03\}$  with  $C = 35$  e  $\gamma(0,0) = 0,84$ , the latter performing better in function of incidence angle variation.

**Keywords:** aplanatic; linear Fresnel; solar concentrator.

## LISTA DE FIGURAS

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 –  | Tecnologias CSP: (a) Disco parabólico; (b) Torre central; (c) Calha parabólica; (d) Concentrador linear Fresnel.                                                                                                                                                                                                           | 19 |
| Figura 2 –  | Abertura total do concentrador linear Fresnel considerando a área bruta do campo primário, incluindo os espaços entre espelhos.                                                                                                                                                                                            | 25 |
| Figura 3 –  | Projeção transversal e longitudinal do ângulo de incidência                                                                                                                                                                                                                                                                | 28 |
| Figura 4 –  | Representação simplificada dos desvios ópticos que resultam no espalhamento da imagem sobre o secundário.                                                                                                                                                                                                                  | 29 |
| Figura 5 –  | Aberração esférica.                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 31 |
| Figura 6 –  | Aberração coma.                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 31 |
| Figura 7 –  | Representação da geometria aplanática referenciada à esfera de Abbe.                                                                                                                                                                                                                                                       | 32 |
| Figura 8 –  | Espelho plano inserido no primário.                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 45 |
| Figura 9 –  | Fator de Interceptação do CLFA em função do raio absorvedor (e de C) para um primário com 72 espelhos planos. Os parâmetros do aplanático são $s = -0,9$ e $K = -0,1$ .                                                                                                                                                    | 47 |
| Figura 10 – | Fator de Interceptação quando 12 espelhos cilíndricos compõem o primário. Parâmetros do aplanático são $s = -0,9$ , $K = -0,1$ e $F = 1,9$ .                                                                                                                                                                               | 49 |
| Figura 11 – | Segmento cilíndrico posicionado no primário original.                                                                                                                                                                                                                                                                      | 50 |
| Figura 12 – | Alargamento mostrando a projeção transversal de dois raios incidindo no ponto médio e na borda direita do segmento cilíndrico.                                                                                                                                                                                             | 51 |
| Figura 13 – | Detalhes da imagem formada no secundário: (a) inclinação da imagem formada no secundário; (b) pontos onde os raios refletidos pelas bordas dos espelhos cilíndricos interceptam o secundário, delimitando a largura $h$ da imagem formada.                                                                                 | 52 |
| Figura 14 – | Comparação entre o fator de interceptação obtido por meio do traçado de raios para curvaturas otimizadas por tentativa e erro e curvaturas cilíndricas previstas pelo método analítico descrito, considerando 12 espelhos cilíndricos seguindo a geometria do primário aplanático com parâmetros $s = -0,9$ e $K = -0,1$ . | 54 |
| Figura 15 – | Concentrador linear Fresnel aplanático para parâmetros $\{-0,9; -0,1\}$ e $\{-2,25; -0,1\}$ para: (a) espelhos seguindo a geometria original, e (b) espelhos posicionados no plano horizontal.                                                                                                                             | 55 |

|             |                                                                                                                                                                                                                                |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 16 – | Posicionamento do espelho plano no plano horizontal.                                                                                                                                                                           | 56 |
| Figura 17 – | Fator de interceptação do CLFA como função do parâmetro $s$ para 72 espelhos planos primários posicionados no plano horizontal, variando-se o valor de $s$ e fixando $K = -0,1$ .                                              | 58 |
| Figura 18 – | Perdas para o solo em função de $s$ para 72 espelhos planos posicionados no plano horizontal, variando-se o valor de $s$ e fixando $K = -0,1$ .                                                                                | 58 |
| Figura 19 – | Fator de interceptação como função do parâmetro $s$ para 12 espelhos cilíndricos seguindo a geometria do primário, variando-se o valor de $s$ e fixando $K = -0,1$ .                                                           | 59 |
| Figura 20 – | Perdas para o solo em função de $-s$ para $N_e = 12$ espelhos cilíndricos posicionados no plano horizontal.                                                                                                                    | 59 |
| Figura 21 – | Fator de interceptação em função da projeção (a) transversal e (b) longitudinal do ângulo de incidência para CLFA com 12 espelhos cilíndricos posicionados no plano horizontal. Parâmetros aplanáticos são $\{-2,25; -0,1\}$ . | 61 |
| Figura 22 – | Raios que incidem entre os espelhos tocam um plano posicionado embaixo do concentrador que serve para quantificar as perdas para o solo.                                                                                       | 66 |
| Figura 23 – | Faces frontal e traseira de um par de espelhos adjacentes utilizadas para contabilizar as perdas por bloqueio.                                                                                                                 | 67 |
| Figura 24 – | Ângulos e pontos de interesse para descrição geométrica das perdas: (a) incidência normal, e (b) incidência para $\theta_t > 0^\circ$ .                                                                                        | 68 |
| Figura 25 – | Frente de onda efetiva para variação transversal do ângulo de incidência.                                                                                                                                                      | 70 |
| Figura 26 – | Transformação de pontos sobre o primário em pontos sobre o plano horizontal.                                                                                                                                                   | 71 |
| Figura 27 – | Perdas para o solo no lado direito do concentrador.                                                                                                                                                                            | 73 |
| Figura 28 – | Sombreamento entre espelhos adjacentes.                                                                                                                                                                                        | 75 |
| Figura 29 – | Largura da sombra do concentrador secundário projetada sobre a frente de onda efetiva.                                                                                                                                         | 76 |
| Figura 30 – | Sombra secundária (a) totalmente sobre o primário, (b) parcialmente sobre o primário e (c) totalmente fora do primário.                                                                                                        | 77 |
| Figura 31 – | Bloqueio entre espelhos no lado direito.                                                                                                                                                                                       | 79 |
| Figura 32 – | Bloqueio entre espelhos para o lado esquerdo.                                                                                                                                                                                  | 80 |
| Figura 33 – | Reflexão do espelho primário que chega com o desvio angular no                                                                                                                                                                 |    |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|             | secundário em relação ao raio de referência que parte do primário original.                                                                                                                                                                                 | 83  |
| Figura 34 – | Ângulo que o raio refletido pelo espelho cilíndrico primário faz com a normal não varia com a variação de $\theta_t$ .                                                                                                                                      | 84  |
| Figura 35 – | Aproximação entre um segmento secundário iluminado pelo cone da radiação e o espelho primário para entendimento das perdas por rejeição.                                                                                                                    | 85  |
| Figura 36 – | Ângulo limite para incidência direta no absorvedor após uma reflexão.                                                                                                                                                                                       | 86  |
| Figura 37 – | Perdas por dispersão.                                                                                                                                                                                                                                       | 87  |
| Figura 38 – | Comprimento não iluminado do absorvedor.                                                                                                                                                                                                                    | 90  |
| Figura 39 – | Variação relativa de $\{s, K\}$ a depender do espelho refletor.                                                                                                                                                                                             | 91  |
| Figura 40 – | CLFA com parâmetros $\{-1; -0,1\}$ e $C = 50$ .                                                                                                                                                                                                             | 93  |
| Figura 41 – | Fator de interceptação em função da variação da projeção transversal do ângulo de incidência. CLFA com parâmetros $s = -1$ , $K = -0,1$ e $C = 50$ .                                                                                                        | 94  |
| Figura 42 – | Fator de interceptação em função da variação da projeção longitudinal do ângulo de incidência. CLFA com parâmetros $s = -1$ , $K = -0,1$ e $C = 50$ .                                                                                                       | 95  |
| Figura 43 – | CFLA com parâmetros $\{-2,25; -0,03\}$ e $C = 35$ .                                                                                                                                                                                                         | 96  |
| Figura 44 – | Fator de interceptação em função da variação da projeção transversal do ângulo de incidência. CLFA com parâmetros $s = -2,2$ , $K = -0,03$ e $C = 35$ .                                                                                                     | 97  |
| Figura 45 – | Fator de interceptação em função da variação da projeção longitudinal do ângulo de incidência. CLFA com parâmetros $s = -2,2$ , $K = -0,03$ e $C = 35$ .                                                                                                    | 98  |
| Figura 46 – | Perdas para o solo em função da variação transversal do ângulo de incidência para CLFA $\{-1; -0,1\}$ .                                                                                                                                                     | 110 |
| Figura 47 – | Perdas por bloqueio em função da variação transversal do ângulo de incidência para CLFA $\{-1; -0,1\}$ . Primeira plotagem, que representa as perdas à direita do concentrador, apresenta pouca discordância entre o método analítico e o traçado de raios. | 111 |
| Figura 48 – | Perdas por sombreamento secundário em função da variação da projeção transversal do ângulo de incidência para CLFA $\{-1; -0,1\}$ .                                                                                                                         | 111 |
| Figura 49 – | Perdas por rejeição de raios e dispersão em função da variação da projeção transversal do ângulo de incidência para CLFA $\{-1; -0,1\}$ .                                                                                                                   | 112 |
| Figura 50 – | Perdas para o solo em função da variação da projeção transversal do ângulo de incidência para CLFA $\{-2,2; -0,03\}$ .                                                                                                                                      | 113 |
| Figura 51 – | Perdas por bloqueio em função da variação da projeção transversal do                                                                                                                                                                                        |     |

|             |                                                                                                                                              |     |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|             | ângulo de incidência para CLFA $\{-2,2; -0,03\}$ .                                                                                           | 113 |
| Figura 52 – | Perdas por sombreamento secundário em função da variação da projeção transversal do ângulo de incidência para CLFA $\{-2,2; -0,03\}$ .       | 114 |
| Figura 53 – | Perdas por rejeição de raios e dispersão em função da variação da projeção transversal do ângulo de incidência para CLFA $\{-2,2; -0,03\}$ . | 114 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|      |                                                                    |
|------|--------------------------------------------------------------------|
| CLFA | Concentrador linear Fresnel aplanático                             |
| CSP  | Concentrated solar power (energia solar concentrada)               |
| DNI  | Direct normal irradiance (irradiação direta normal)                |
| DOE  | Departament of energy (departamento de energia dos Estados Unidos) |
| LCOE | Levelized cost of electricity (custo nivelado da eletricidade)     |
| LFR  | Linear Fresnel reflector (concentrador linear Fresnel)             |
| PTC  | Parabolic trough (concentrador parabólico)                         |
| PV   | Photovoltaic cell (células fotovoltaicas)                          |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                |                                                                               |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| $A_{ab}$       | área de abertura primária                                                     |
| $A_{abs}$      | área do tubo absorvedor                                                       |
| $C$            | concentração geométrica                                                       |
| $R_{abs}$      | raio absorvedor                                                               |
| $\eta_{th}$    | eficiência térmica                                                            |
| $\eta_{opt}$   | eficiência óptica                                                             |
| $\theta_s$     | semiângulo de abertura total do feixe de radiação                             |
| $Q_{abs}$      | energia absorvida pelo absorvedor                                             |
| $\rho$         | refletividade                                                                 |
| $\alpha$       | absortividade                                                                 |
| $\tau$         | transmissividade                                                              |
| $L$            | comprimento do conjunto de espelhos primários                                 |
| $\gamma$       | fator de interceptação                                                        |
| $\theta$       | ângulo de incidência                                                          |
| $\theta_t$     | projeção transversal do ângulo de incidência                                  |
| $\theta_L$     | projeção longitudinal do ângulo de incidência                                 |
| $\gamma_t$     | fator de interceptação transversal                                            |
| $\gamma_L$     | fator de interceptação longitudinal                                           |
| $\sigma_{sol}$ | desvio padrão da distribuição probabilística do brilho solar                  |
| $\sigma_{esp}$ | desvio padrão associado à reflexão fora da direção especular                  |
| $\sigma_{geo}$ | desvio padrão associado às deformações geométricas das superfícies refletoras |
| $\sigma_{ras}$ | desvio padrão associado ao rastreamento imperfeito                            |
| $f_{Abbe}$     | raio da esfera de Abbe                                                        |
| $r_p$          | coordenada abscissa do primário aplanático                                    |
| $r_s$          | coordenada abscissa do concentrador secundário aplanático                     |
| $x_p$          | coordenada ordenada do primário aplanático                                    |
| $x_s$          | ordenadas do secundário aplanático                                            |
| $\varphi$      | ângulo de saída do raio refletido pelo secundário                             |
| $s$            | distância entre os vértices do primário e do secundário                       |
| $K$            | distância entre o vértice do espelho secundário e o foco do sistema           |
| $N_e$          | número de espelhos                                                            |

|           |                                                                                                           |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\psi$    | ângulo entre o raio refletido e a horizontal                                                              |
| $\mu$     | ângulo entre o raio refletido e a bissetriz do espelho                                                    |
| $\beta$   | diferença angular entre um ponto no espelho cilíndrico e seu ponto médio                                  |
| $R$       | raio de curvatura cilíndrica                                                                              |
| $\omega$  | inclinação do espelho                                                                                     |
| $r_{pc}$  | coordenada abscissa do ponto médio do espelho primário cilíndrico                                         |
| $r_{pd}$  | coordenada abscissa da borda direita do espelho cilíndrico                                                |
| $r_{pe}$  | coordenada abscissa da borda esquerda do espelho cilíndrico                                               |
| $x_{pc}$  | coordenada ordenada do ponto médio do espelho primário cilíndrico                                         |
| $x_{pd}$  | ordenada da borda direita do espelho cilíndrico                                                           |
| $x_{pe}$  | ordenada da borda esquerda do espelho cilíndrico                                                          |
| $Y_f$     | reta de frente de onda                                                                                    |
| $Y_l$     | reta que passa pela borda direita do espelho                                                              |
| $Y_s$     | reta que passa pela borda esquerda do espelho                                                             |
| $Y_{som}$ | reta de sombra                                                                                            |
| $FO$      | frente de onda efetiva                                                                                    |
| $G$       | perda para o solo                                                                                         |
| $w_{gs}$  | projeção dos espaços entre espelhos na frente de onda                                                     |
| $ws$      | largura da sombra do concentrador secundário                                                              |
| $xf$      | reta na direção da frente de onda                                                                         |
| $xt$      | reta na direção do raio incidente                                                                         |
| $r_{ps}$  | coordenada para calcular quando a sombra secundária começa a sair do primário                             |
| $S$       | perda por sombreamento secundário                                                                         |
| $w_b$     | intervalo angular bloqueado                                                                               |
| $r_{pb1}$ | abscissa limite da região bloqueada                                                                       |
| $r_{pb2}$ | abscissa limite da região bloqueada relacionada à posição da borda esquerda                               |
| $\delta$  | diferença angular entre um raio refletido por um espelho cilíndrico e o primário aplanático original      |
| $B$       | perda por bloqueio                                                                                        |
| $R_{il}$  | raio absorvedor iluminado                                                                                 |
| $\zeta$   | ângulo entre o raio refletido pela borda direita e o raio que atinge uma das bordas do espelho secundário |

- $\sigma$  ângulo entre o raio refletido pela borda esquerda do espelho e o raio que atinge uma das bordas do espelho secundário
- D perda por dispersão

## SUMÁRIO

|          |                                                                                                                                   |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                                                                                                 | <b>17</b> |
| 1.1      | A TECNOLOGIA CSP                                                                                                                  | 18        |
| 1.2      | CONCENTRADOR LINEAR FRESNEL COMO OPÇÃO CSP DE MAIOR PRATICIDADE E MENOR CUSTO                                                     | 20        |
| 1.3      | CONCENTRADOR LINEAR APLANÁTICO DE DUPLA REFLEXÃO COMO ALTERNATIVA AO PTC                                                          | 21        |
| 1.4      | JUSTIFICATIVA                                                                                                                     | 22        |
| 1.5      | DIVISÃO DO TRABALHO                                                                                                               | 22        |
| 1.6      | OBJETIVO                                                                                                                          | 23        |
| <b>2</b> | <b>CONCEITOS PRELIMINARES</b>                                                                                                     | <b>24</b> |
| 2.1      | CONCENTRAÇÃO GEOMÉTRICA                                                                                                           | 24        |
| 2.2      | EFICIÊNCIA ÓPTICA E FATOR DE INTERCEPTAÇÃO TRANSVERSAL E LONGITUDINAL                                                             | 26        |
| 2.3      | ERROS ÓPTICOS                                                                                                                     | 28        |
| 2.4      | GEOMETRIA APLANÁTICA                                                                                                              | 30        |
| <b>3</b> | <b>REVISÃO DA LITERATURA</b>                                                                                                      | <b>35</b> |
| 3.1      | ESTRATÉGIAS PARA MELHORAR O DESEMPENHO ÓPTICO DO CONCENTRADOR LINEAR FRESNEL                                                      | 35        |
| 3.2      | CONCENTRADOR LINEAR FRESNEL DE DUPLA REFLEXÃO                                                                                     | 36        |
| 3.3      | GEOMETRIA APLANÁTICA APLICADA À CONCENTRAÇÃO SOLAR                                                                                | 39        |
| <b>4</b> | <b>APLANÁTICO FRESNEL COMO CONCENTRADOR SOLAR LINEAR</b>                                                                          | <b>42</b> |
| 4.1      | METODOLOGIA                                                                                                                       | 42        |
| 4.1.1    | Identificação de parâmetros de projeto para um CLFA de alto desempenho                                                            | 42        |
| 4.1.2    | CLFA com espelhos primários planos que seguem a forma do aplanático original                                                      | 44        |
| 4.1.3    | CLFA com espelhos primários cilíndricos que seguem a geometria do primário do aplanático e derivação teórica do raio de curvatura | 47        |
| 4.1.4    | Transição do concentrador aplanático para sua versão Fresnel                                                                      | 54        |

|       |                                                                                                                 |     |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2   | RESULTADOS PARCIAIS                                                                                             | 56  |
| 4.2.1 | Sensibilidade do fator de interceptação aos parâmetros $s$ , $K$                                                | 56  |
| 4.2.2 | Resultados para o CLFA com espelhos primários à mesma altura                                                    | 57  |
| 4.2.3 | Perdas ópticas adicionais associadas aos ângulos de incidência projetados                                       | 60  |
| 4.3   | CONCLUSÕES PARCIAIS                                                                                             | 61  |
| 5     | DESENVOLVIMENTO ANALÍTICO DOS MECANISMOS DE PERDAS DO CONCENTRADOR LINEAR FRESNEL APLANÁTICO                    | 64  |
| 5.1   | METODOLOGIA                                                                                                     | 64  |
| 5.1.1 | Perdas ópticas típicas dos concentradores lineares Fresnel                                                      | 64  |
| 5.1.2 | Cálculo das perdas ópticas individuais via traçado de raios                                                     | 65  |
| 5.2   | VARIÁVEIS DE RASTREAMENTO E PONTOS DE INTERESSE                                                                 | 68  |
| 5.3   | PERDAS TRANSVERSAIS DE NATUREZA INCIDENTE                                                                       | 69  |
| 5.3.1 | Perdas para o solo                                                                                              | 70  |
| 5.3.2 | Sombreamento entre espelhos adjacentes                                                                          | 74  |
| 5.3.3 | Perdas por sombreamento do concentrador secundário                                                              | 76  |
| 5.4   | PERDAS TRANSVERSAIS DE NATUREZA REFLETIVA                                                                       | 78  |
| 5.4.1 | Perdas por bloqueio                                                                                             | 78  |
| 5.4.2 | Rejeição de raios                                                                                               | 82  |
| 5.4.3 | Dispersão                                                                                                       | 87  |
| 5.5   | FATOR DE INTERCEPTAÇÃO TRANSVERSAL                                                                              | 88  |
| 5.6   | FATOR DE INTERCEPTAÇÃO LONGITUDINAL                                                                             | 89  |
| 5.7   | RESULTADOS                                                                                                      | 92  |
| 6     | CONSIDERAÇÕES FINAIS                                                                                            | 99  |
|       | REFERÊNCIAS                                                                                                     | 102 |
|       | APÊNDICE A – RESULTADOS DAS PERDAS INDIVIDUAIS PARA O CLFA COM PARÂMETROS $s = -1$ , $K = -0,1$ E $C = 50$ .    | 110 |
|       | APÊNDICE B – RESULTADOS DAS PERDAS INDIVIDUAIS PARA O CLFA COM PARÂMETROS $s = -2,2$ , $K = -0,03$ E $C = 35$ . | 113 |

## 1 INTRODUÇÃO

Os dados mais recentes apontam que, no período de 2009 a 2019, o consumo de energia proveniente de fontes primárias renováveis cresceu 2,5 % em todo o mundo, alcançando 11,2 % do consumo total em 2019 (REN21, 2021). A energia elétrica gerada a partir de tais fontes representou 30 % do total de eletricidade produzida no mundo em 2021. Crescimento de 1 % em relação a 2020 (IEA, 2022a).

Dentre as fontes renováveis, a energia solar é estratégica e fundamental para consolidar a mudança da matriz elétrica mundial para um perfil menos poluente. Trata-se de uma fonte de energia inesgotável na escala de tempo humana, podendo ser convertida diretamente em eletricidade através de células fotovoltaicas (do inglês, photovoltaic cell - PV), ou em calor, através de tecnologias de concentração solar (do inglês, concentrated solar power – CSP).

Restringindo a contextualização ao Brasil, verifica-se que as fontes renováveis foram responsáveis por 84,8 % da oferta de energia elétrica no país em 2020 (EPE, 2021). Entretanto, desse percentual, 65,2 % foram provenientes das usinas hidrelétricas, que demandam reservatórios com, pelo menos, 10 % da capacidade para operarem (ONS, 2022), evidenciando a necessidade da diversificação da matriz elétrica nacional. O aumento da participação de outras fontes renováveis, em especial da energia termelétrica solar, ajuda a evitar crises energéticas e contribui para a preservação ambiental.

O país encontra-se situado quase que totalmente na região limitada pelos Trópicos de Câncer e de Capricórnio, de incidência mais vertical dos raios solares, onde a irradiação solar direta normal (do inglês, direct normal irradiance – DNI) alcança bons níveis. O Nordeste é a região que possui maior média de irradiação direta normal (1844 kWh/m<sup>2</sup>.ano), com áreas do semiárido, mais precisamente na porção Oeste do Estado da Bahia e Sul do Piauí, onde a média ultrapassa os 2000 kWh/m<sup>2</sup>.ano (PEREIRA et al., 2017). Esse excelente recurso, aliado à baixa nebulosidade, reúne as condições apropriadas à geração CSP (SCHLECHT; MEYER, 2012; MARTINS et al., 2012).

Além do excelente recurso solar disponível, outra vantagem é que a indústria nacional pode fornecer materiais, componentes e equipamentos necessários à geração termelétrica CSP a um preço competitivo. Para comparação, apesar do forte crescimento PV, o Brasil não possui indústria nacional para fabricação de células fotovoltaicas, que é o item de maior custo na cadeia de valor de uma planta PV. Em contrapartida, o país possui indústrias para produção da maioria dos equipamentos de plantas CSP.

O país conta com empresas de metalmecânica capazes de construir estruturas metálicas para o campo solar CSP. Todo o bloco de potência, considerando os trocadores de calor (caldeiras e superaquecedor), turbina e geradores, já são desenvolvidos por fabricantes nacionais. Alguns fluidos de transferência de calor, como os óleos sintéticos térmicos, também são fabricados nacionalmente. A indústria de espelhos de vidro também estaria apta a fornecer material para o campo solar, com a adoção de pequenas alterações nas linhas de produção de vidro curvo e com baixo teor de ferro já existentes. Também já existe fabricação nacional de sais fundidos, porém em pequena escala. Além da escala, a composição dos sais teria que ser adaptada (SOUZA; CAVALCANTI, 2017; P&D ANEEL, 2021).

Entretanto, apesar do bom recurso solar e do ambiente industrial propício, a geração CSP foi inaugurada recentemente no país. Em janeiro de 2022 a primeira planta entrou em operação na cidade de Rosana-SP: a Usina de Porto Primavera, que conta com 0,5 MW de potência instalada (HELIO SCSP, 2022; EUDORA, 2022). Tal fato evidencia que a tecnologia está muito aquém do seu potencial no Brasil, e que, para o seu desenvolvimento, políticas de regulação, de incentivo às geradoras e direcionados à indústria nacional devem ser implementadas.

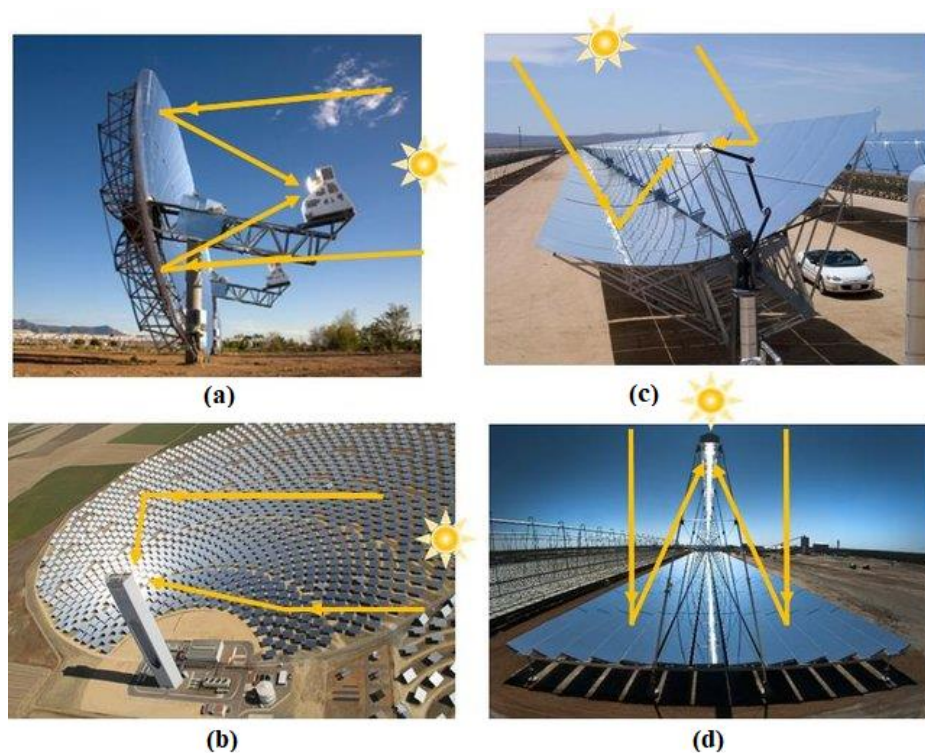
## 1.1 A TECNOLOGIA CSP

A tecnologia CSP é versátil e possui aplicações diversas. Além da geração termelétrica isolada, o calor superaquecido produzidos na geração CSP pode ser usado para geração híbrida em plantas à carvão, gás ou biomassa, reduzindo impactos ambientais (WANG, 2019). Ela também pode - de forma isolada ou em cogeração - produzir calor para processos industriais (SOUZA et al., 2020), reatores químicos (CHEN et al., 2018), dessalinização (GUDE, 2018), aquecimento e/ou refrigeração (MISHRA; SINGH, 2018).

Quando usadas para geração termelétrica, a irradiação solar direta normal é concentrada no tubo absorvedor evacuado posicionado no foco do sistema óptico por onde passa óleo térmico, água/vapor, ar ou sais fundidos. Esses fluidos aquecidos transportam o calor para o armazenamento ou para um ciclo água-vapor que alimenta um bloco de potência. A conversão eletromecânica é feita através da expansão de vapor superaquecido numa turbina acoplada a um gerador elétrico. O calor armazenado fica disponível para uso durante os períodos sem insolação, permitindo a operação ininterrupta da turbina. Devido a sua alta capacidade calorífica, sais fundidos são utilizados como fluido de armazenamento térmico (SECUNDES et al., 2018).

Os sistemas CSP são classificados de acordo com suas características focais, podendo ser (a) tridimensionais ou de foco pontual, ou (b) bidimensionais ou de foco linear. Torres Solares e Discos Parabólicos são exemplos de sistemas de foco pontual (Figuras 1a e 1b), e alcançam temperaturas de até 1300 °C (ISLAM et al., 2017), pois possibilitam maior concentração da DNI. Os sistemas de Calha Parabólica (do inglês, parabolic trough collector - PTC) e Linear Fresnel (do inglês, linear Fresnel reflector - LFR) são exemplos da tecnologia com foco linear (Figuras 1c e 1d), atingindo temperatura de operação no intervalo de 350 °C a 550 °C (MACHINDA et al., 2011).

Figura 1 – Tecnologias CSP: (a) Disco parabólico; (b) Torre central; (c) Calha parabólica; (d) Concentrador linear Fresnel.



Fonte: Eusébio (2017).

A geração termelétrica CSP tem custo nivelado da eletricidade (do inglês, levelized cost of electricity – LCOE) aproximadamente três vezes maior que a PV (AWAN et al., 2019; KOST et al., 2018). Porém, limitar a comparação unicamente ao LCOE esconde o potencial da tecnologia CSP, pois há margem para o seu desenvolvimento com estudos sobre: (a) novas estratégias para posicionamento dos espelhos primários e seus rastreamentos, (b) a inclusão de espelhos secundários de formatos variados que melhoram a eficiência óptica dos

concentradores e (c) a utilização de nanofluidos que aumentam a eficiência térmica dos sistemas (BELLOS, 2019).

Além disso, o armazenamento térmico CSP - que, comparado aos acumuladores de carga utilizadas na geração PV, apresenta menor custo, maior vida útil e maior segurança - fornece despachabilidade aos sistemas solares (AL-GHUSSAIN et al., 2022). A energia despachável garante o fornecimento ininterrupto de energia e gera benefícios econômicos pois possibilita a implementação de tarifas dinâmicas. Pode-se destacar, ainda, que a variabilidade da geração PV impõe desafios operacionais ao sistema elétrico. Ao contrário do que se observa na geração CSP, que pode ser conectada à rede tal como é feito nas termelétricas convencionais, sem nenhum efeito adverso (WANG, 2019).

Desta forma, e diante das potencialidades de cada uma, as tecnologias CSP e PV devem agregar suas vantagens tecnológicas através da hibridização das plantas solares. Um projeto em fase avançada de construção que representa bem essa combinação, é a instalação solar híbrida Noor Energy 1, no Parque Solar Mohammed bin Rashid, Emirados Árabes Unidos. A planta pretende fornecer 24 horas de energia por dia, combinando 700 MW de CSP com 250 MW de PV para obter um LCOE de 0,073 US\$/kWh (NOOR, 2022).

Tendo em vista as potencialidades e dificuldades expostas, pesquisas inovativas que foquem no desenvolvimento da tecnologia CSP devem ser incentivadas. Nesse espírito, o departamento de energia dos Estados Unidos (do inglês, department of energy - DOE) anunciou um programa para desenvolvimento da terceira geração de sistemas CSP (Gen 3 CSP), que objetiva reduzir os custos da tecnologia abaixo de 0,05 US\$/kWh até 2030 (NREL, 2022a).

## 1.2 CONCENTRADOR LINEAR FRESNEL COMO OPÇÃO CSP DE MAIOR PRATICIDADE E MENOR CUSTO

O alvo deste trabalho é um sistema de foco linear, com rastreamento solar através de um único eixo (Norte-Sul ou Leste-Oeste), simplificando a construção, a operação e, consequentemente, os custos do campo solar. Outra vantagem é a descrição matemática bidimensional facilita a obtenção de novos projetos geométricos/ópticos.

Dentre os concentradores de foco linear, o LFR apresenta vantagens práticas em relação aos PTC pois:

1. O primário LFR é segmentado, enquanto o PTC é contínuo. Desta forma, as cargas de vento são menores no LFR (MONTES et al., 2017; MORIN et al., 2015);

2. O sistema de rastreamento do LFR é mais simples pois os espelhos primários rotacionam à mesma altura, com mesma velocidade, não havendo grandes movimentos do sistema (OLIVEIRA, 2015);

3. O absorvedor PTC se move durante sua operação enquanto o LFR permanece estático, simplificando as conexões e reduzindo o risco de vazamento de fluido térmico;

Entretanto, dos aproximadamente 6,7 GW de pico de usinas solares térmicas comerciais de grande escala instaladas (IEA, 2021b), cerca de 90 % possuem campo solar PTC com absorvedores de tubos evacuados (HELIOSCSP, 2020). Essa discrepância ocorre devido às diversas fontes de perdas no LFR não existentes no PTC que reduzem sua eficiência óptica.

As vantagens práticas do LFR acarretam em: (a) introdução de sombreamento e perdas por bloqueio entre os espelhos primários, (b) perda de parte da irradiação solar incidente que não atinge nenhum espelho primário e é perdida para o solo diretamente (NIXON et al., 2013; HONGN et al., 2015), (c) necessidade de um espelho secundário para aumentar a eficiência óptica que incorre em maiores perdas por absorção devido à segunda reflexão e (d) perda de grande quantidade dos raios refletidos que não atingem o absorvedor diretamente ou não entram na abertura do secundário (dispersão).

A penalidade energética associada ao LFR é específica do local onde a planta está instalada, dependendo da disponibilidade da irradiação solar direta e da latitude. Com base em estudos para climas com bons níveis de irradiação solar direta em latitudes médias (MORIN et al., 2012; GIOSTRI et al., 2013; CASARTELLI et al., 2015; SHARMA et al., 2015; COCCO, CAU, 2015; BELLOS, TZIVANIDIS, 2018), a coleta média anual de energia de plantas PTC supera a de sistemas LFR, mas o custo cerca de 50 % menor e as virtudes práticas do LFR o fazem merecer comercialização em larga escala.

### 1.3 CONCENTRADOR LINEAR APLANÁTICO DE DUPLA REFLEXÃO COMO ALTERNATIVA AO PTC

Teoricamente, o concentrador linear Fresnel pode ser considerado uma calha parabólica com abertura infinita. Caso uma geometria com desempenho óptico superior ou equivalente a parabólica seja utilizada, sua conversão para a versão Fresnel pode culminar num concentrador linear de desempenho superior aos LFRs convencionais.

Dentre as possibilidades, a geometria aplanática é superior à parabólica pois possibilita a eliminação das aberrações esférica e coma. O uso de um concentrador linear com

dupla reflexão e geometria aplanática como alternativa aos PTCs apresentado por Gomes et al. (2019) destaca-se, pois, apresenta bons resultados de concentração geométrica e fator de interceptação (ver definição desses conceitos nas Seções 2.1 e 2.2). Foram exemplificados no referido trabalho diversos casos de raio de absorvedor para futuras implantações práticas, de acordo com as dimensões e concentrações requeridas em projetos CSP. Dentre os concentradores propostos e estudados, o aplanático elíptico com raio absorvedor de 0,0075 m se destacou: alcançou 37,13 de concentração geométrica, a um fator de interceptação total de 0,98. Desempenho superior ao PTC comercial com  $C = 26,2$  e fator de interceptação de 0,93 (MANIKANDAN et al., 2019).

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

Existem 13 plantas (10 operacionais) LFR para geração de eletricidade no mundo, localizadas na China, Estados Unidos, Espanha, Itália, França, Índia e Austrália (NREL, 2022b). Este cenário demonstra um interesse mundial pela tecnologia. Entretanto, também é notório que há o desafio de aumentar a concentração e a eficiência óptica do LFR, o que, tendo em vista a sua praticidade, contribuiria para a redução do custo nivelado da eletricidade CSP.

Desta forma, a elaboração deste trabalho justifica-se pela necessidade de obter um concentrador solar que reúna as vantagens relacionadas à construção, manutenção, operação e custo final observadas no LFR, com desempenho óptico comparável à calha parabólica. Para tal, surge a ideia e a consequente necessidade de estudos sobre os resultados da substituição do primário da geometria aplanática, que é superior a parabólica, por sua versão Fresnel, sem alterar o espelho secundário.

#### 1.5 DIVISÃO DO TRABALHO

O trabalho é constituído por quatro capítulos, que se somam a este capítulo introdutório. O Capítulo 2 apresenta o conceito e as equações da geometria aplanática e define concentração geométrica, eficiência óptica, e fator de interceptação, que serão as métricas utilizadas para avaliar o desempenho do concentrador. A natureza dos erros ópticos associados aos concentradores solares e o modo como são descritos também são apresentados.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os projetos inovadores de concentradores lineares Fresnel, destacando as características de cada projeto que são relevantes ao trabalho.

O Capítulo 4 apresenta os conceitos geométricos e físicos que permitem configurar concentradores Fresnel de elevada concentração e fator de interceptação para uma determinada abertura do feixe incidente de radiação solar. O concentrador linear Fresnel aplanático é descrito com metodologia, resultados e conclusões próprias, escritas com base na publicação intitulada “Linear aplanatic Fresnel reflector for practical high-performance solar concentration” no volume 222 da revista Solar Energy (SOUZA et al., 2021).

O Capítulo 5 apresenta a modelagem analítica de todas as perdas inerentes ao concentrador linear Fresnel aplanático com metodologia, resultados e conclusões próprias, escritas com base no trabalho em fase final de elaboração para publicação futura em revista especializada na área de energia solar, intitulado “Totally analytic optical evaluation of linear aplanatic solar Fresnel reflectors”.

## 1.6 OBJETIVO

Propor e avaliar um novo concentrador linear Fresnel com absorvedor cilíndrico e dupla reflexão, com primário e secundário projetados a partir das características ópticas da geometria aplanática (concentrador linear Fresnel aplanático - CLFA).

Os objetivos específicos são:

- Apresentar e avaliar o CLFA como um concentrador solar térmico, investigando as diversas possibilidades de conversão Aplanático-Fresnel;
- Avaliar, através do traçado de raios, o desempenho óptico do CLFA em função da variação da projeção transversal e longitudinal do ângulo de incidência;
- Desenvolver e validar com traçado de raios um modelo analítico para os mecanismos de perdas do CLFA em função da variação da projeção transversal e longitudinal do ângulo de incidência;
- Desenvolver e validar com traçado de raios um modelo analítico para cálculo do fator de interceptação do CLFA em função da variação da projeção transversal e longitudinal do ângulo de incidência.

## 2 CONCEITOS PRELIMINARES

Este capítulo apresenta a definição das principais figuras de mérito utilizadas para avaliar o concentrador proposto neste trabalho: a concentração geométrica e o fator de interceptação. Elas são de extrema importância à concentração solar, sendo citadas e analisadas ao longo de todo o trabalho. Conceitua-se ainda a natureza dos erros associados aos concentradores solares, bem como o modo de descrevê-los. Por fim, as características ópticas da geometria aplanática e suas equações são apresentadas.

### 2.1 CONCENTRAÇÃO GEOMÉTRICA

Todas as tecnologias CSP possuem um objetivo: concentrar o máximo de irradiação direta normal num foco geométrico. Desta forma, pode-se definir uma importante métrica utilizada para avaliação de concentradores solares - a concentração geométrica - através da razão:

$$C = \frac{A_{ab}}{A_{abs}} \quad (1)$$

na qual  $A_{abs}$  representa a área do absorvedor e  $A_{ab}$  a área total de abertura do concentrador.

A concentração geométrica é parâmetro importante para a caracterização de sistemas CSP, pois permite reduzir perdas térmicas na proporção de  $1/C$ . Simplificando as equações apresentadas por Bendt et al. (1979) que descrevem essa relação, temos:

$$\eta_{th} = \eta_{opt} - \frac{perdas_{th}}{DNI \times C} \quad (2)$$

na qual  $\eta_{th}$  é a eficiência térmica,  $\eta_{opt}$  é a eficiência óptica e  $perdas_{th}$  são as perdas térmicas observadas proporcionais à temperatura do absorvedor medida em  $W/m^2$ , e DNI é a irradiação direta normal sobre a abertura do concentrador medida em  $W/m^2$ .

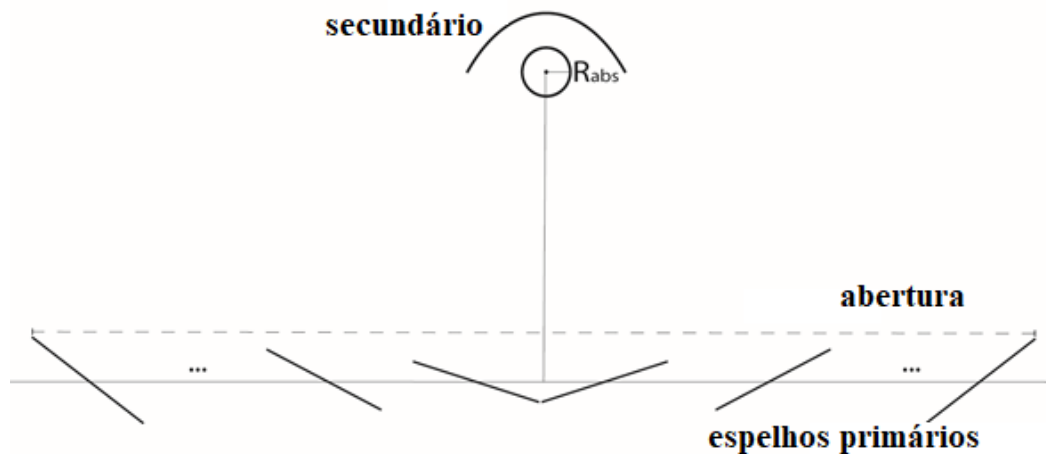
Em contrapartida, deve-se cuidar para que o benefício da redução das perdas térmicas através do aumento da concentração não reduza a eficiência óptica em tal magnitude que a eficiência térmica acabe sendo menor.

No concentrador linear Fresnel, a abertura de coleta de energia é baseada em toda a extensão do campo de espelhos primários, ou seja, a área total do terreno, incluindo os

espaços entre os espelhos. Aumentar o espaçamento entre os espelhos primários, sem alterar suas larguras, aumenta  $C$ , mas também aumenta as perdas para o solo, reduzindo a eficiência óptica.

Ao longo do trabalho, a concentração vai ser calculada com base na coordenada das bordas dos últimos espelhos. Sendo assim, a abertura é a distância entre as bordas dos espelhos mais afastadas da origem do sistema (do absorvedor), como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Abertura total do concentrador linear Fresnel considerando a área bruta do campo primário, incluindo os espaços entre espelhos.



Fonte: O autor (2022).

Para concentradores lineares e absorvedor cilíndrico de raio  $R_{abs}$ , com comprimento longitudinal do conjunto de espelhos primários  $L$  (ver Figura 3, seção 2.2), tem-se que  $A_{ab} = abertura.L$  e  $A_{abs} = 2.\pi.R_{abs}.L$ . Antes de calcular a concentração por meio da abertura, deve-se dizer que todos os espelhos têm a mesma largura e estão justapostos, ou seja, posicionados de forma a não haver espaço entre eles no cenário em que suas normais estão perpendiculares ao plano horizontal. Na operação real do sistema, este cenário nunca acontece, já todos os espelhos têm inclinação diferentes que variam com a posição do Sol. Desta forma, a concentração geométrica será:

$$C = \frac{abertura}{2\pi R_{abs}} \quad (3)$$

e a máxima concentração atingível pelos concentradores lineares, respeitando o limite termodinâmico (RABL, 1985), é:

$$C_{\max} = \frac{1}{\sin \theta_s} \quad (4)$$

Sendo assim,  $C$  deve ser sempre menor que  $C_{\max}$ , e  $\theta_s$  corresponde ao intervalo angular máximo de abertura do feixe de raios incidentes aceito pela geometria do concentrador, ou seja, o semiângulo do cone solar. Este, medido a partir do centro do Sol, pode ser facilmente calculado conhecendo a distância Terra-Sol e vale, aproximadamente,  $4,7 \text{ mrad} \cong 0,25^\circ$ , sendo a menor abertura angular a ser considerada em projetos de concentração solar. Entretanto, em sistemas realísticos, é preciso aumentar o semiângulo do cone solar para além desse valor, de forma a incluir o desvio padrão de erros totais associados ao concentrador e à dispersão na atmosfera.

$\theta_s$  é estimado como o valor médio quadrático (do inglês, root mean square – RMS) obtido a partir da convolução da distribuição de brilho solar com as distribuições probabilísticas dos erros associados às imperfeições geométricas dos espelhos, à especularidade, ao desalinhamento do absorvedor e ao rastreamento (RABL, 1985). Em concentradores solares bidimensionais comerciais de grande escala, com valores de concentração de aproximadamente 26,  $\theta_s = 9 \text{ mrad}$  é facilmente alcançável (GEE et al., 2010) e será usado em todas as simulações apresentadas ao longo do trabalho.

## 2.2 EFICIÊNCIA ÓPTICA E FATOR DE INTERCEPTAÇÃO TRANSVERSAL E LONGITUDINAL

A eficiência de coletores concentradores pode ser definida como a razão entre a potência absorvida pelo absorvedor ( $Q_{\text{abs}}$ ) e a DNI instantânea, em  $\text{W/m}^2$ , multiplicada pela área de abertura do concentrador ( $A_{\text{ab}}$ ), em  $\text{m}^2$  (irradiação solar coletada) (RABL, 1985):

$$\eta_{\text{opt}} = \frac{Q_{\text{abs}}}{A_{\text{ab}} \cdot \text{DNI}} \quad (5)$$

A eficiência óptica também pode ser escrita em termos das propriedades ópticas e geométricas do concentrador, fazendo:

$$\eta_{\text{opt}} = \tau \alpha (\gamma_1 \rho + \gamma_2 \rho^2) \quad (6)$$

na qual,  $\rho$  é a refletividade dos espelhos primários e secundários,  $\tau$  é a transmissividade do invólucro de vidro do tubo absorvedor,  $\alpha$  é a absortividade do revestimento seletivo do tubo absorvedor,  $\gamma_1$  é o fator de interceptação relativo aos raios que atingem o absorvedor diretamente após serem refletidos pelos espelhos primários, e  $\gamma_2$  é o fator de interceptação relativo aos raios que atingem o absorvedor após serem refletidos pelo espelho secundário. O fator de interceptação total é  $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$ .

Em modelos mais realísticos, as propriedades ópticas são funções do ângulo de incidência. Por simplicidade, considera-se nesse trabalho os valores médios dessas propriedades (HOWELL et al., 2020).

Os valores de  $\rho$ ,  $\tau$  e  $\alpha$  são dependentes dos materiais utilizados para fabricação dos componentes do concentrador, e podem ser tratados como aproximadamente independentes da geometria, isto é, do projeto óptico primário e secundário, que influenciam diretamente apenas o valor de  $\gamma$ . O fator de interceptação total,  $\gamma$ , é a fração dos raios que chegam ao absorvedor em relação aos que atingem a abertura do concentrador, considerando valores ideais de transmitância, refletividade e absortividade.

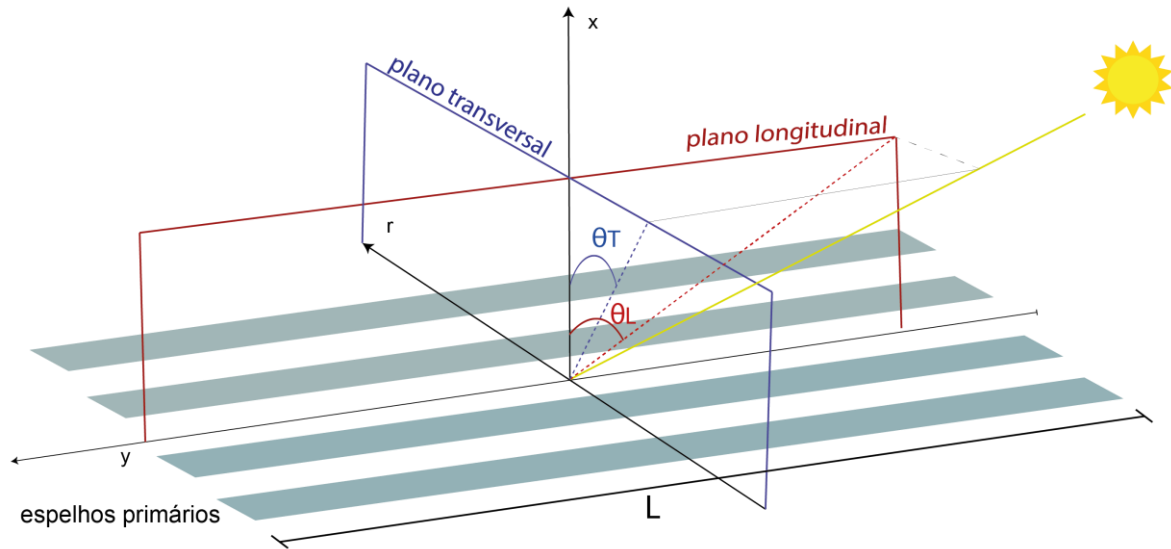
As perdas geométricas serão discutidas de modo mais detalhado no Cap. 5. Elas estão relacionadas ao bloqueio e ao espaçamento entre espelhos, ao sombreamento secundário, à dispersão e rejeição de raios. Desta forma, determinam essencialmente o fator de interceptação  $\gamma$ , que é definido como sendo:

$$\gamma = \frac{\text{Quantidade de raios interceptados pelo absorvedor}}{\text{Quantidade de raios incidentes na abertura do concentrador}} \quad (7)$$

O ângulo de incidência,  $\theta$ , é o ângulo entre o feixe de luz que incidente e reta normal à abertura do concentrador. As curvas de eficiência de coletores solares são geralmente medidas na incidência normal, que é a escolha mais adequada para condições de teste padronizadas. Entretanto, a variação do ângulo de incidência deve ser considerada quando se avalia o concentrador em termos da estimativa da energia total absorvida durante certos períodos.

As avaliações apresentadas ao longo desse trabalho foram realizadas, de forma preliminar, na incidência normal ( $\theta = 0$ ). Mas as discussões finais levam em conta que  $\gamma$  tem uma forte dependência das duas projeções de  $\theta$ : a transversal ( $\theta_t$ ), no plano r-x de concentração; e a longitudinal ( $\theta_L$ ), no plano ortogonal (y-x), como mostrado na Figura 3. Desta forma, para analisar a dependência individual de cada ângulo projetado, fixa-se um deles em zero, sendo o outro é variado no intervalo de 0 a 85°.

Figura 3 – Projeção transversal e longitudinal do ângulo de incidência.



Fonte: O autor (2022).

Em princípio, as dependências são acopladas no valor de  $\theta$ . Mas para as faixas limitadas de  $C$  e  $\theta_s$  pertinentes aos projetos de concentradores interessantes a esse trabalho, a fatoração de  $\gamma$  é uma aproximação satisfatória (MCINTIRE, 1982; ZHU, 2013), sendo:

$$\gamma(\theta_t, \theta_L) \cong \gamma(\theta_t, 0) \gamma(0, \theta_L) \quad (8)$$

e

$$\eta_{\text{opt}}(\theta_t, \theta_L) \cong \rho \tau \alpha [\gamma_1(\theta_t, \theta_L) \rho + \gamma_2(\theta_t, \theta_L) \rho^2] \quad (9)$$

## 2.3 ERROS ÓPTICOS

Os desvios ópticos estão relacionados às imperfeições em níveis microscópicos (causada pela rugosidade da superfície) e macroscópicos (causada pela gravidade, ação do vento, deformação ou defeito de fabricação) do material óptico que constitui a superfície refletora, resultando em espalhamento da radiação para além da direção ideal (RABL, 1985).

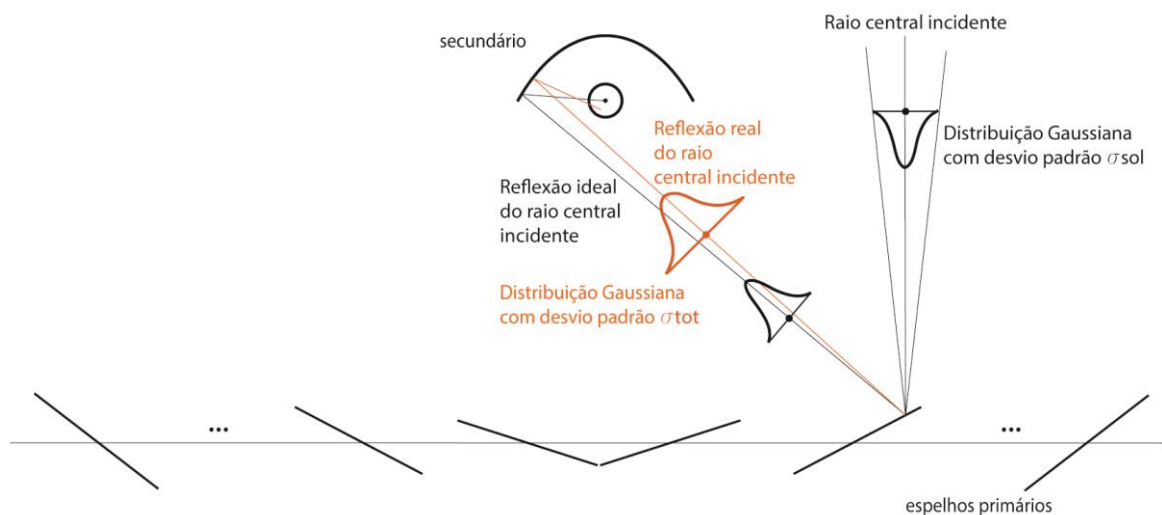
Os erros também são devido ao rastreamento impreciso dos espelhos primários, ao desalinhamento do absorvedor e a outros fatores que porventura precisem ser considerados em cenários específicos. Estes podem ser representados por distribuições de probabilidade, geralmente Gaussiana ou constante (pillbox) num determinado intervalo angular.

Há também os desvios ópticos relacionados ao tamanho variável do Sol, causado pela mudança da distância Terra-Sol e das características atmosféricas (PEDROSA-FILHO, 2013).

O formato do Sol é tipicamente representado por uma distribuição de brilho descrita em função do ângulo sólido com respeito ao centro do Sol.

A principal consequência dos erros ópticos no concentrador linear Fresnel aplanático de dupla reflexão é o espalhamento da imagem na superfície do secundário. Tal espalhamento faz com que, após a segunda reflexão, parte dos raios não atinja o foco do sistema e, a depender do desvio angular, nem o absorvedor é atingido (perda por rejeição de raios), como mostrado na Figura 4. Além disso, parte dos raios refletidos pelo primário não entram na abertura secundária (perda por dispersão). Estas duas fontes de perdas afetam diretamente o fator de interceptação,  $\gamma$ . O raio do absorvedor deve ser suficientemente grande para reduzir as perdas associadas a esse fenômeno, o que pode diminuir a concentração, aumentando as perdas térmicas e reduzindo a eficiência térmica do concentrador.

Figura 4 – Representação simplificada dos desvios ópticos que resultam no espalhamento da imagem sobre o secundário.



Fonte: O autor (2022).

Não é preciso conhecer detalhes sobre a distribuição probabilística individual de cada erro, reduzindo o problema a encontrar os desvios padrão delas. Isto porque o Teorema do Limite Central da estatística diz que a convolução de um número suficientemente grande de distribuições independentes aproxima-se de uma distribuição normal, mesmo elas não sendo gaussianas. Portanto, sempre que a média das distribuições individuais seja nula, o que normalmente acontece com os erros ópticos associados aos concentradores solares (FRAIDENRAICH; LYRA, 1995), o desvio padrão da distribuição resultante para o concentrador linear Fresnel é (ZHU; LEWANDOWSKI, 2012):

$$\sigma_{\text{tot}} = \sqrt{\sigma_{\text{sol}}^2 + \sigma_{\text{esp}}^2 + (2\sigma_{\text{geo}})^2 + (2\sigma_{\text{ras}})^2 + \sigma_{\text{abs}}^2} \quad (10)$$

na qual  $\sigma_{\text{sol}}$ ,  $\sigma_{\text{esp}}$ ,  $\sigma_{\text{geo}}$ ,  $\sigma_{\text{ras}}$ ,  $\sigma_{\text{abs}}$  são, respectivamente, os desvios padrão das distribuições probabilísticas do brilho solar, e dos erros associados à reflexão fora da direção especular, às deformações geométricas das superfícies refletoras, ao rastreamento e ao desalinhamento do absorvedor. O valor RMS do erro total,  $\sigma_{\text{tot}}$ , define o espalhamento total do feixe de radiação depois de atingir o sistema CSP.

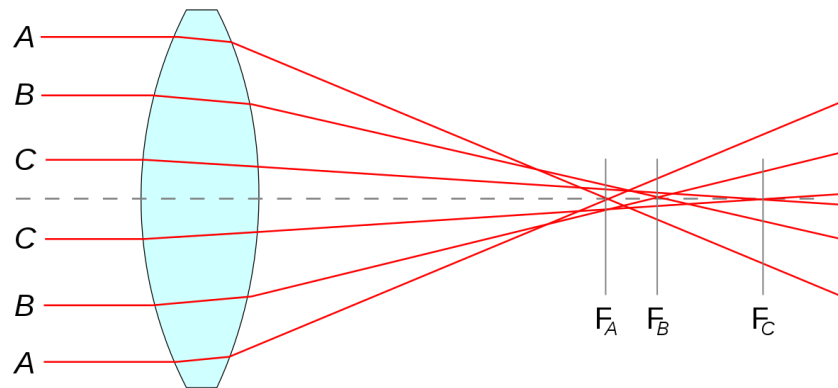
Para a inserção dos erros ópticos totais observados nos concentradores, o semiângulo considerado nesse trabalho é de 2 sóis, o que corresponde a aproximadamente 9 mrad. Dependendo da acurácia óptica pode-se atribuir um semiângulo solar maior ou menor, mas esta consideração de 2 sóis é bastante razoável (WINSTON et al., 2005).

## 2.4 GEOMETRIA APLANÁTICA

A geometria aplanática é uma óptica formadora de imagem composta por dois espelhos que eliminam completamente as aberrações esférica e coma (LYNDEN-BELL, 2002; GORDON, 2010).

A aberração esférica (Figura 5) é uma imperfeição da imagem formada em virtude da curvatura esférica da lente ou do espelho (Marshall et al., 2015). Devido à aberração esférica, a distância focal é diferente para raios que atravessam o sistema óptico em diferentes posições, como mostrado na Figura 5, na qual os raios A, B e C são focalizados em pontos diferentes ( $F_A$ ,  $F_B$  e  $F_C$ , respectivamente). Em concentradores lineares, esse efeito pode gerar grande perda de radiação que não atinge o absorvedor posicionado no foco. Concentradores parabólicos eliminam a aberração esférica.

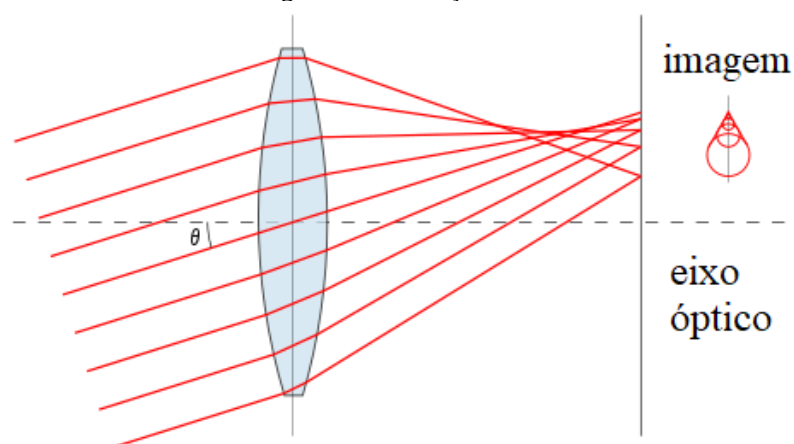
Figura 5 – Aberração esférica.



Fonte: Hahn (2011).

A aberração coma é quando o dispositivo óptico forma imagem fora do eixo óptico. Acontece quando os raios incidentes individuais atingem a lente ou o espelho com um certo ângulo de incidência,  $\theta$ , e não são refletidos para um mesmo ponto (GOMES et al., 2019, p. 26, apud COURROL; PRETO, 2011). Isso faz com que a imagem seja formada fora do campo de visão e apareça borrada (com o formato de uma cauda de cometa), como mostrado na Figura 6. Quanto maior for  $\theta$ , mais intenso será o efeito. Os erros de rastreamento observados nos concentradores solares podem gerar perda excessiva de radiação em virtude dessa aberração. Concentradores parabólicos não eliminam a aberração coma, aplanáticos sim.

Figura 6 – Aberração coma.



Fonte: Panther (2005).

Para ser considerada uma geometria aplanática, o sistema óptico deve satisfazer o princípio de Fermat, a lei de Snell e a condição do seno de Abbe (GORDON, 2010):

1. O princípio de Fermat estabelece que o comprimento do caminho óptico percorrido por qualquer raio que ingressa no sistema óptico e atinge o absorvedor é constante. Desta forma, com base na Figura 7, e considerando o índice de refração do meio de propagação de valor unitário:

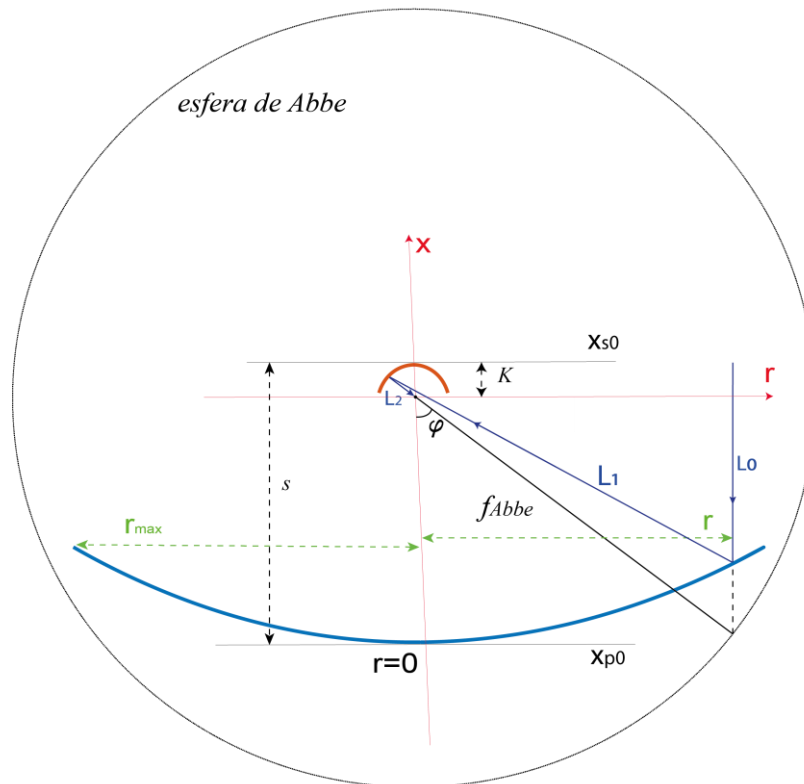
$$L_0 + L_1 + L_2 = \text{constante} \quad (11)$$

2. A lei de Snell, ou simplesmente a lei da reflexão, estabelece que o raio é refletido com o mesmo ângulo que incide sobre a superfície refletora.

3. A condição do seno de Abbe estabelece que a relação entre a distância entre o ponto onde o raio que ingressa na abertura toca o primário e a origem do sistema - isto é, a coordenada abscissa  $r$  (ver Figura 7) -, e o seno do ângulo com o qual o raio deixa o sistema ( $\varphi$ ) é constante e igual ao raio da esfera de Abbe ( $f_{\text{Abbe}}$ ) (LYNDEN-BELL, 2002):

$$f_{\text{Abbe}} = \frac{r}{\sin \varphi} = \text{constante} \quad (12)$$

Figura 7 – Representação da geometria aplanática referenciada à esfera de Abbe.



Fonte: O autor (2022).

Considera-se que o foco do concentrador está na origem (0,0) do sistema de coordenadas r-x, e a escala é ajustada de acordo com o raio da esfera de Abbe,  $f_{\text{Abbe}}$  (OSTROUMOV et al., 2009).

$\varphi$  é o ângulo de saída dos raios que ingressam na abertura, também chamado de ângulo de borda (Gomes et al., 2019). Considerando  $f_{\text{Abbe}} = 1$ ,  $\varphi$  está relacionado à abscissa do ponto onde o raio incidente toca o primário através da equação:

$$r = \sin \varphi \quad (13)$$

na qual o valor de  $\varphi$  pode variar de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ . Seu valor máximo,  $\varphi_{\text{max}}$ , define a semiabertura total do primário, isto é,  $r_{\text{max}}$ .

A solução analítica das equações que definem o aplanático baseia-se na definição dos parâmetros  $s$  e  $K$ , que relacionam a posição dos vértices do primário e secundário. O parâmetro  $s$  tem valor adimensional e determina a distância que separa os vértices dos dois espelhos. Considerando  $f_{\text{Abbe}} = 1$ , seu valor é obtido através das ordenadas dos vértices do secundário ( $x_{s0}$ ) e do primário ( $x_{p0}$ ), fazendo:

$$s = \frac{x_{p0} - x_{s0}}{f_{\text{Abbe}}} \quad (14)$$

De modo semelhante, o parâmetro  $K$  também é adimensional, sendo a distância entre o foco do sistema e o vértice do secundário:

$$K = \frac{-x_{s0}}{f_{\text{Abbe}}} \quad (15)$$

De posse dos valores de  $s$  e  $K$ , as equações que definem as duas superfícies do aplanático podem ser apresentadas (LYNDEN-BELL, 2002; GORDON, 2010). Para cada valor de  $\varphi$ , há uma coordenada (r,x) associada, tanto no primário (subscrito p) como no secundário (subscrito s), obtidas do equacionamento:

$$\begin{cases} r_p = \sin \varphi \\ x_p = s - \cos^2(\varphi/2) + \frac{g(\varphi)}{2} (1 - Kf(\varphi)) \cos^4(\varphi/2) \\ r_s = \frac{2sKf(\varphi) \tan(\varphi/2)}{Kf(\varphi) \tan^2(\varphi/2) + g(\varphi)} \\ x_s = -r_s \cot(\varphi) \end{cases} \quad (16)$$

na qual

$$\begin{cases} g(\varphi) = s - (1 - s) \tan^2(\varphi/2) \\ f(\varphi) = \left| \frac{g(\varphi)}{s} \right|^{\frac{s}{s-1}} \end{cases} \quad (17)$$

Com base na observação das equações e dos diversos testes feitos ao longo da execução desse trabalho, percebeu-se que a geometria aplanática se aproxima de uma parábola quando o valor de  $K$  tende a zero. Constituinte, efetivamente, uma parábola quando  $K = 0$ .

Os valores de  $s$  e  $K$  podem ser variados de forma a obter aplanáticos com diferentes formatos para a dupla de espelhos. Estes valores, então, influenciam diretamente no desempenho do aplanático como concentrador solar. Influenciam também na conversão do concentrador para sua versão Fresnel (como mostrado nos Caps. 4 e 5). Destaca-se que a variação do parâmetro  $K$  influencia na abertura do secundário, podendo reduzir ou aumentar as perdas por sombreamento do concentrador secundário. A variação de  $s$  define a distância entre os vértices do primário e secundário, e também é proporcional à profundidade do primário. Primários com menor profundidade favorecem a conversão para a versão Fresnel do sistema, pois resultam em menores perdas para o solo.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta uma revisão sobre os diversos projetos de concentrador linear Fresnel disponíveis na literatura. Inicialmente, as estratégias de maior relevância para melhorar o desempenho óptico do LFR são comentadas. Depois, restringe-se a revisão aos LFR com secundário e espelhos nivelados à mesma altura, próximos ao solo, similares ao concentrador proposto nesse trabalho. Revisa-se, ainda, a aplicação da geometria aplanática para concentração solar.

#### 3.1 ESTRATÉGIAS PARA MELHORAR O DESEMPENHO ÓPTICO DO CONCENTRADOR LINEAR FRESNEL

Ao longo do tempo, ideias inovadoras foram apresentadas objetivando melhorar o desempenho do LFR. Algumas viraram protótipos, outras se restringiram ao conceito devido a sua difícil implementação prática.

O modo como dispor os espelhos primários foi explorado por Mills e Morrison (2000), que idealizaram o concentrador linear Fresnel compacto (do inglês, compact linear Fresnel reflector - CLFR), utilizando dois absorvedores para diminuir o sombreamento e as perdas por bloqueio. A estratégia aumenta a eficiência óptica do sistema, mas o novo mecanismo de rastreamento e os dois absorvedores introduzem dificuldades construtivas e operacionais. Horta et al. (2011) e Chaves e Collares-Pereira (2012) modificaram o CLFR original com a inclusão de espelhos primários com diferentes alturas e larguras, chamando-o de Etendue-matched CLFR. Zhu e Huang (2014) e Oliveira et al. (2015) estudaram o LFR com diferentes alturas dos espelhos primários, obtendo uma segmentação parabólica para reduzir sombreamento e as perdas por bloqueio.

Outros projetos visaram a redução das perdas por efeito de borda (do inglês, end losses). Hongn e Larsen (2018) estenderam o absorvedor alguns metros depois do campo solar para captar mais energia nos momentos de altitude solar baixa. Yang et al. (2018) examinaram um sistema que tem os espelhos primários móveis se deslocando linearmente na direção Norte-Sul. Outros autores estudaram a inclinação dos espelhos primários na direção Norte-Sul (Pulido-Iparraguirre et al., 2019; Ma e Chang, 2018).

Estudos analisaram os ganhos ópticos obtidos a partir do ajuste simultâneo do conjunto de espelhos primários e do absorvedor. Zhu et al. (2017) e Manikumar e Arasu

(2014) estudaram o efeito de ajustes na inclinação Leste-Oeste do sistema, e o projeto de Huang et al. (2014) acompanhou o deslocamento solar azimutal.

Percebe-se que a maioria dos projetos são de difícil construção e operação. Como o objetivo do trabalho é propor um LFR com dupla reflexão, que apresente vantagens práticas em relação ao PTC, restringiu-se a revisão a concentradores mais simplificados. Na seção seguinte, são analisados projetos que se utilizam apenas do artifício de incluir um concentrador secundário para obter ganhos ópticos, sem que seja preciso alterar a elevação dos espelhos, nem a forma tradicional de rastreamento dos espelhos primários, tampouco a inclusão ou a extensão de tubos absorvedores.

### 3.2 CONCENTRADOR LINEAR FRESNEL DE DUPLA REFLEXÃO

Pode-se constatar através da literatura que, inicialmente, alguns projetos de PTC com secundário otimizado e óptica não formadora de imagem buscaram melhorar o desempenho dos concentradores lineares (MANIKANDAN et al., 2019; COLLARES-PEREIRA et al., 1991; MILLS, 1995; BENÍTEZ et al., 1997; CANAVARRO et al., 2013; CANAVARRO et al., 2016).

Para o caso do LFR, projetos vêm sendo idealizados com o objetivo de melhorar seu desempenho óptico nos sistemas com tubo absorvedor evacuado, a partir da inclusão de secundários a uma distância pequena acima do invólucro de vidro do absorvedor. Os secundários utilizados em LFR podem ser divididos em concentradores:

1. com geometria pré-definida, a maioria sendo CPC (do inglês, compound parabolic concentrator), CEC (do inglês, compound elliptical concentrator), trapezoidal ou asa-dupla (do inglês, two-wings), ou
2. otimizados (obtidos sob medida para o primário, ou ponto a ponto, de forma adaptativa a um primário pré-existente).

Feuermann e Gordon (1991) foram os primeiros a discutir a ideia de um LFR com dupla reflexão utilizando um secundário do tipo CPC, obtendo 67 % de eficiência óptica, a uma concentração de 18,2, com absorvedor a uma altura de 2,2 m.

Canavarro et al. (2014) utilizaram o método de superfície múltipla simultânea (do inglês, simultaneous multiple surface – SMS) para obter um secundário sob medida para um primário segmentado. A eficiência óptica obtida foi de 70 % a uma concentração geométrica de 52,95, com absorvedor a uma altura de 9,8 m. As simulações foram feitas para um perfil solar com distribuição probabilística total uniforme (do inglês, pillbox) e semiângulo  $\theta_s = 12$

mrاد. Os autores ainda apresentam uma versão com maior concentração geométrica (73,71) e maior eficiência óptica (72 %), porém com resultados obtidos através de simulações que consideram o perfil solar com distribuição uniforme e semiângulo total  $\theta_s = 7,7$  mrاد.

Qiu et al. (2017) buscaram melhorar a distribuição de fluxo no absorvedor utilizando espelhos primários com curvatura e dois tipos de secundário (trapezoidal e CPC), e obtiveram 67 % de eficiência óptica para o primeiro e 65,4 % para o segundo. Para o caso com secundário CPC, a concentração geométrica calculada foi 68, com absorvedor a uma altura de 8 m. Nas simulações os autores utilizaram uma distribuição de brilho uniforme para o Sol, com semiângulo total  $\theta_s = 4,65$  mrاد, uma distribuição Gaussiana com desvio  $\sigma_{geo} = 1$  mrاد para representar os erros ópticos associados à superfície refletora.

Prasad et al. (2017) analisaram três tipos de secundário: TC (do inglês, trapezoidal concentrator), CPC e SPC (do inglês, segmented parabolic concentrator). Os pesquisadores obtiveram distribuição da radiação mais uniforme sobre o absorvedor, variando individualmente a linha de mira de cada espelho primário com curvaturas cilíndricas. Com esta estratégia, obtiveram o melhor desempenho com secundário SPC ( $\eta_{opt} = 76,4$  %). Os autores não especificaram qual a distribuição de brilho solar, nem o semiângulo total utilizado. Quando os erros ópticos são incluídos (fixou-se  $\sigma_{geo} = 4,4$  mrاد e variou-se  $\sigma_{ras}$  no intervalo de 0 mrاد a 4,4 mrاد) há uma redução na eficiência óptica do concentrador com secundário SPC para valores menores que 68 %. O concentrador com secundário CPC e reta na qual a bissetriz de cada espelho toca (chamada no artigo de linha de mira) fixa para todos os espelhos primários, mantém bom desempenho ( $\eta_o = 75\%$ ) com a inclusão do erro óptico, porém com distribuição não uniforme de fluxo sobre o absorvedor. A concentração geométrica é de 58, com absorvedor a uma altura de 7,9 m.

Canavarro et al. (2017) apresentam um secundário duplo assimétrico do tipo CEC. O espelho secundário é composto por três partes: CEC, involuta e ranhuras em V (do inglês, V-grooves). A eficiência óptica obtida foi de 70 % com concentração geométrica de 52,95 e absorvedor a uma altura de 10,8 m. As simulações foram feitas utilizando uma distribuição uniforme de brilho e semiângulo total  $\theta_s = 13,1$  mrاد.

Hack et al. (2017) comparam o secundário obtido através de um método adaptativo proposto com secundários CPC, trapezoidal e asa-dupla. Através do método adaptativo, o secundário não assume nenhuma forma analítica predefinida; em vez disso, constitui uma forma otimizada, maximizando a coleta de energia no tubo absorvedor. A eficiência óptica obtida foi de 72 % a uma concentração geométrica de 37,13, com absorvedor a uma altura de

7 m. As simulações foram realizadas considerando uma distribuição de brilho gaussiana e desvio total  $\sigma_{\text{tot}} = 7\text{mrad}$ .

Bellos et al. (2018) otimiza o secundário utilizando o polinômio de Belzier. Calcula uma eficiência óptica da forma otimizada de 72,84 % a uma concentração geométrica de 20,46. Os autores não informam qual distribuição de brilho solar, nem o valor do semiângulo total ou do desvio total utilizado.

Vouros et al. (2019) propõe a otimização de um secundário CPC e obtém eficiência óptica de 75 % a uma concentração geométrica de 27,5, com absorvedor a uma altura de 2,57 m. Os pesquisadores consideraram uma distribuição gaussiana, com desvio total  $\sigma_{\text{tot}} = 7\text{mrad}$ . Outros resultados variando o valor do desvio total para 12 mrad resultaram na diminuição da eficiência óptica para valores menores que 70%.

A Tabela 1 apresenta o resumo dos principais parâmetros analisados. Os estudos mostram que não é possível fazer uma comparação analisando apenas os valores de eficiência óptica e concentração. Os projetos estudados possuem parâmetros distintos que impossibilitam comparar os desempenhos de forma mais precisa. Diferentes distribuições probabilísticas totais, valores de absortividade, transmissividade e refletividade foram utilizados. É preciso uma normalização destes valores para que uma comparação justa possa ser feita.

Tabela 1 - Resumo das principais características ópticas dos projetos LFR com dupla reflexão.

| <b>Autores</b>   | <b>Eficiência Óptica</b> | <b>Concentração</b> | <b>Distribuição de probabilidade/Desvio padrão total</b>                                                           | <b><math>\rho\tau\alpha</math></b> | <b>Ano</b> |
|------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------|
| Vouros et al.    | 75%                      | 27,5                | Gaussiana/<br>$\sigma_{\text{tot}} = 7 \text{ mrad}$                                                               | 0,93                               | 2019       |
| Bellos et al.    | 72,84%                   | 20,46               | -                                                                                                                  | 0,82                               | 2018       |
| Hack et al.      | 72%                      | 37,13               | Gaussiana/<br>$\sigma_{\text{tot}} = 7 \text{ mrad}$                                                               | 0,88                               | 2017       |
| Canavarro et al. | 70%                      | 45                  | Pillbox/<br>$\theta_s = 13,1 \text{ mrad}$                                                                         | 0,86                               | 2017       |
| Prasad et al.    | 75%                      | 58                  | Gaussiana/<br>$\sigma_{\text{tot}} = 4,4 \text{ mrad}$                                                             | 0,83                               | 2017       |
| Qiu et. al.      | 65,4%                    | 68                  | Pillbox (solar)/<br>$\theta_s = 4,65 \text{ mrad}$<br>Gaussiana (erros)/<br>$\sigma_{\text{tot}} = 1 \text{ mrad}$ | 0,85                               | 2017       |

|                    |     |       |                                                                                                                    |      |      |
|--------------------|-----|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|
| Canavarro et al.   | 70% | 52,95 | Pillbox/<br>$\theta_s = 12 \text{ mrad}$                                                                           | 0,84 | 2014 |
| Feuermann e Gordon | 67% | 18,2  | Pillbox (solar)/<br>$\theta_s = 4,65 \text{ mrad}$<br>Gaussiana (erros)/<br>$\sigma_{\text{tot}} = 1 \text{ mrad}$ | 0,90 | 1991 |

Fonte: O autor (2022).

Nota-se também uma diferença considerável entre as concentrações geométricas calculadas, que devem ser analisadas em conjunto com a eficiência óptica, pois definem a eficiência térmica (BENDT et al., 1979). A concentração reduz as perdas térmicas, mas o efeito dessa redução não interfere significativamente na eficiência térmica quando se tem elevada eficiência óptica.

O objetivo dessa revisão bibliográfica não é estabelecer uma comparação entre projetos em termos da eficiência óptica e concentração. Mas confirmar que o concentrador linear Fresnel aplanático pode alcançar bons resultados ópticos a altas concentrações, comparáveis aos concentradores lineares propostos ao longo dos anos, reunindo vantagens teóricas e práticas não identificadas nos projetos estudados. O que pode ser dito é que tais projetos não possuem formulação fechada e baseiam-se em soluções iterativas, apresentando aspectos que dificultam a construção, como secundários de formato incomum e altura do conjunto absorvedor/secundário que pode chegar a 11 m. Todos estes fatores resultam em altos custos para fabricação e em dificuldades para operação e manutenção.

### 3.3 GEOMETRIA APLANÁTICA APLICADA À CONCENTRAÇÃO SOLAR

Os aplanáticos utilizam-se de dois espelhos para eliminar completamente as aberrações esférica e coma, sendo projetados, inicialmente, para aplicação em telescópios (HEAD, 1957; LYNDEN-BELL, 2002). Trata-se, portanto, de uma óptica formadora de imagem, com fonte de tamanho pontual. Mais recentemente, a óptica aplanática foi explorada para concentração solar, e se mostrou eficiente ao aproximar-se do limite termodinâmico da concentração (GORDON; FEUERMANN, 2005; WINSTON; GORDON, 2005; GORDON et al., 2008; OSTROUMOV et al., 2009).

Gordon (2010) estudou a aplicação do aplanático para concentração fotovoltaica (do inglês, concentrator photovoltaics - CPV), visando extrair a máxima eficiência possível das células PV submetendo-as a alta concentração solar. O autor afirma que os aplanáticos podem

ser perfeitamente aplicados para concentração solar, pois permitem folgas consideráveis entre os espelhos e o absorvedor sem perda de concentração. E conclui que, como a óptica aplanática é derivada com base em uma aproximação de fonte pontual para o sol, ela produz concentradores de alto desempenho apenas para  $\theta_s < 20$  mrad, intervalo angular apropriado aos projetos de concentradores solares.

A dupla de espelhos possui formulação fechada, que permite a exploração de uma infinidade de configurações, facilitando tanto os estudos de otimização quanto as técnicas de fabricação. Embora grande parte do espaço de combinações  $s$  e  $K$  não sirvam para concentração solar, algumas delas podem gerar concentradores com desempenho comparável às ópticas não formadoras de imagem (GOLDSTEIN; GORDON, 2011).

Segundo Ostroumouv et al. (2009), há oito combinações possíveis, variando os sinais de  $s$  e  $K$  ou o posicionamento do absorvedor acima ou abaixo do secundário. Os autores concluem que dessas, apenas seis combinações são possíveis de serem construídas. Gomes et al. (2019) reduzem para duas as combinações apropriadas à concentração solar com tubo absorvedor cilíndrico, nomeando-as de aplanáticos hiperbólicos e elípticos.

Gomes et al. (2019) estudaram a viabilidade de um concentrador solar térmico de dupla reflexão e absorvedor cilíndrico com geometria aplanática, e obtiveram resultados de concentração geométrica entre 37 e 46 para um fator de interceptação total acima de 0,9 para o concentrador aplanático elíptico com parâmetros  $s=-0,1$  e  $K=-0,9$ , o que representa uma concentração maior do que a observada no PTC (entre 23 e 26). Além disto, pode-se citar algumas outras vantagens do concentrador linear aplanático elíptico proposto:

1. A geometria do concentrador secundário é de fácil fabricação e otimização, pois possui expressões de forma fechada, pelas quais é desenhado sob medida para o primário;
2. Seu dimensionamento pode ser feito considerando absorvedores com dimensões comerciais;
3. É possível alterar o raio do absorvedor mantendo primário e secundário inalterados;
4. Trata-se de uma geometria com óptica formadora de imagem, mas que aceita raios com amplitude angular adequada às dimensões do Sol;

É preciso selecionar quais os melhores parâmetros  $s$  e  $K$ , delimitadores da geometria aplanática, que possibilitem a conversão para um concentrador linear Fresnel. A escolha dos aplanáticos mais adequados foi feita, inicialmente, com base na profundidade do primário, que deve ter dimensão dentro de limites que favoreçam sua substituição por espelhos segmentados, nivelados à uma mesma altura num plano horizontal. Primários mais rasos

favorecem a sua substituição por espelhos segmentados, pois menor quantidade de perda para o solo é inserida.

A escolha do melhor aplanático foi feita através de testes na variação dos parâmetros  $s$  e  $K$ . Através do traçado de raios, o fator de interceptação para diferentes configurações do concentrador é apresentado no próximo capítulo.

## 4 APLANÁTICO FRESNEL COMO CONCENTRADOR SOLAR LINEAR

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada e os resultados obtidos a partir da substituição do primário do concentrador aplanático de foco linear discutido por (GOMES et al., 2019) por espelhos segmentados, caracterizando o Concentrador Linear Fresnel Aplanático (CLFA). Dois cenários de projeto foram considerados: (a) espelhos acompanhando a geometria primária, e (b) nivelados à mesma altura, próximo ao solo. Deduziu-se, ainda, uma solução analítica para cálculo de curvaturas cilíndricas dos espelhos primários, o que possibilita a redução do número de espelhos, mantendo alto fator de interceptação. O desempenho do CLFA em termos das componentes transversal e longitudinal do fator de interceptação também é apresentado.

### 4.1 METODOLOGIA

A seguir serão expostos os conceitos fundamentais que guiam as escolhas geométricas e físicas que permitem configurar os concentradores Fresnel de elevada concentração e fator de interceptação para uma determinada abertura do feixe incidente de radiação solar.

#### 4.1.1 Identificação de parâmetros de projeto para um CLFA de alto desempenho

O espaço paramétrico (ou seja, as combinações de  $s$ ,  $K$  e  $\phi_{\max}$ ) para projetos aplanáticos de espelho duplo é amplo (Gomes et al., 2019). No entanto, a implementação de aplanáticos práticos, com valores de concentração e fator de interceptação comparáveis aos dos concentradores solares 2D existentes, exige uma redução acentuada no número de possibilidades.

Por exemplo, embora existam duas classes de curvatura para o espelho secundário (convexo e côncavo), o fato de que a concentração atingível é função do seno do ângulo de saída do concentrador ( $\phi$ ) (RABL, 1985; WINSTON et al., 2005) limita projetos práticos a secundários côncavos. De acordo com estas considerações, a Equação 4 se modifica segundo  $C_{\max} = \sin(\phi)/\sin(\theta_s)$ . Outra restrição prática é manter uma altura viável entre o conjunto absorvedor/espelho secundário acima dos espelhos primários.

Aproveitando o estudo de otimização para aplanáticos viáveis com alta concentração e fator de interceptação (GOMES et al., 2019), optou-se como ponto de partida pelo projeto de

melhor desempenho, com parâmetros  $s = -0,9$ ,  $K = -0,1$  e  $\varphi_{\max} = 85^\circ$  e investigou-se como o espelho primário contínuo pode ser substituído por uma versão segmentada.

O caráter segmentado do primário do CLFA incorre em perdas ópticas inevitáveis por algumas razões, todas discutidas de forma mais detalhada no Cap. 5. Primeiro, a largura finita de cada segmento resulta em raios incidentes fora do ponto médio de cada segmento, em pontos não ideais e com direções incorretas que acabam não atingindo o absorvedor. Isso expande a imagem refletida do Sol no absorvedor e, portanto, diminui  $\gamma$ . Esses raios perdidos entram na conta das perdas por rejeição. Curvar os segmentos do espelho primário atenua parcialmente este problema, como discutido no Cap. 5.

Em segundo lugar, considerando o espelho plano posicionado tal como mostrado na Figura 8, os raios que tocam próximo à extremidade esquerda do espelho primário não entram na abertura do secundário e são contabilizados como perdas por dispersão (discutidas no Cap. 5).

Em terceiro lugar, os segmentos de espelhos primários - que tem a mesma largura e estão justapostos, ou seja, posicionados de forma a não haver espaço entre eles quando suas normais estão perpendiculares ao plano horizontal - podem sombrear e/ou bloquear segmentos vizinhos, dependendo de quão próximos eles estão posicionados, configurando as perdas por bloqueio (do inglês, blocking losses), e o sombreamento entre espelhos adjacentes (do inglês, shading).

Em quarto, os espaçamentos que reduzem as perdas por bloqueio a níveis aceitavelmente baixos devem intrinsecamente aumentar as perdas para o solo (do inglês, ground losses).

Tendo em vista tais características, resultados foram obtidos considerando dois cenários de projeto:

1. os espelhos primários seguindo a forma do aplanático original o que minimiza o bloqueio e as perdas para o solo, e
2. todos os segmentos do espelho primário tendo seu ponto médio na mesma altura mínima acima do nível do solo.

O primeiro pode ser menos praticável, mas atinge fator de interceptação mais alto para uma dada concentração quando comparado ao segundo.

Inicialmente, para substituir o primário por espelhos planos segmentados, a semiabertura do primário aplanático é dividida pelo número total de espelhos a serem inseridos ( $N_e$ ). A inserção dos espelhos planos ocorre em duas etapas. Primeiramente, os espelhos são posicionados num plano horizontal. Em seguida cada segmento é elevado a uma

altura onde seu ponto médio corresponde ao do primário aplanático contínuo (ver Figura 8). Deste modo, cada espelho tem uma elevação  $x_{pi}$  conhecida.

Todos os projetos foram avaliados da mesma maneira, considerando inicialmente seu desempenho para a incidência normal ( $\theta = 0$ ) e, em seguida, generalizando para cálculos de desempenho em toda a faixa de ângulos de incidência transversais e longitudinais.

Levou-se em conta a projeção da sombra do concentrador secundário sobre os espelhos primários para todos os ângulos de incidência. E, de início, para definir a escala, a largura do refletor primário completo de cada concentrador foi escolhida como 1,9925 m para todos os exemplos apresentados, obtido da fixação de  $\phi_{\max} = 85^\circ$ . Fixou-se  $\phi_{\max} = 85^\circ$  pois trata-se de um valor mais realista, já que ângulos mais próximos de  $90^\circ$  são fisicamente impossíveis de se obter.

#### 4.1.2 CLFA com espelhos primários planos que seguem a forma do aplanático original

Cada espelho plano primário é alocado de modo que seu ponto médio seja o mesmo do aplanático original, na altura  $x_{pi}$  para cada segmento  $i$  (onde, na Figura 8,  $x$  é a ordenada,  $r$  é a abscissa e o subscrito  $p$  denota o primário).

A inclinação de cada segmento é calculada de modo que o raio incidente no ponto médio de cada espelho ( $r_{pi}$ ,  $x_{pi}$ ) seja refletido ao seu ponto correspondente no secundário ( $r_{si}$ ,  $x_{si}$ ) (o subscrito  $s$  denota o secundário), que é conhecido das soluções analíticas para aplanáticos de espelho duplo (GORDON, 2010; LYDEN-BELL, 2002).

A regra de rastreamento para os segmentos do espelho primário mantém o ângulo de  $2\mu$  fixo, perante variação da posição do Sol, de modo que o raio central refletido atinja o secundário no ponto correto e com a direção apropriada (ver Figura 8). Isso garante que, após a segunda reflexão (caso haja), o raio incidente na posição central de cada espelho plano atinja o absorvedor do CLFA.

A Figura 8 apresenta um corte transversal no concentrador que permite a dedução da equação para o cálculo do ângulo entre o raio refletido e o plano horizontal,  $\psi$ , fazendo:

$$\tan \psi = \frac{x_{si} - x_{pi}}{r_{pi} - r_{si}} \quad (18)$$

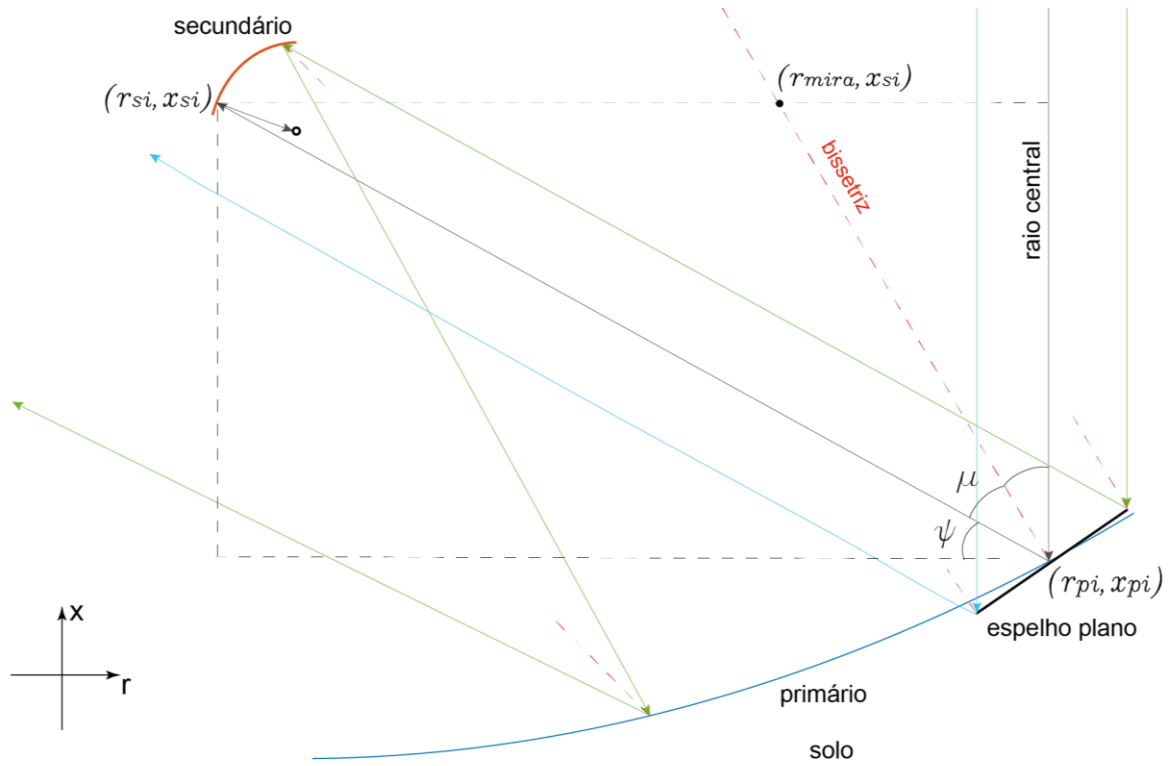
A relação entre o ângulo de inclinação do espelho,  $\mu$ , e o ângulo  $\psi$  é:

$$2\mu = \frac{\pi}{2} - \psi \quad (19)$$

As inclinações dos espelhos são calculadas de forma que suas bissetrizes toquem o ponto  $(r_{mira}, x_{si})$ , onde  $x_{si}$  corresponde à coordenada secundária para a qual o raio central é refletido. Com o valor de  $\mu$ , é possível calcular o valor de  $r_{mira}$ , que é a coordenada  $r$  de intersecção da reta horizontal ( $x_{si}$ ) com a bissetriz do ângulo formado pelo raio incidente normal e o raio refletido por cada espelho:

$$r_{mira} = r_{pi} - (x_{si} - x_{pi}) \tan \mu \quad (20)$$

Figura 8 – Espelho plano inserido no primário.



Fonte: O autor (2022).

Alguns raios interceptam a parte inferior do tubo absorvedor após uma reflexão do espelho primário. Outros atingem o absorvedor após uma segunda reflexão do secundário. Normalizando essas duas contribuições para o número total de raios incidentes na abertura do concentrador, define-se as componentes do fator de interceptação total,  $\gamma$ , para reflexão simples e dupla como sendo  $\gamma_1$  e  $\gamma_2$ , respectivamente (GOMES et al., 2019), e:

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (21)$$

Em contradição, nos aplanáticos de espelho duplo desenvolvidos para concentradores solares 3D com absorvedores planos monofaciais voltados para cima (GORDON, 2010), os raios que atingem a parte inferior do absorvedor após a reflexão do refletor primário são bloqueados e, portanto, representam uma perda óptica.

Inicialmente, as perdas por rejeição foram reduzidas através da inserção de um número maior de espelhos. Aumentando o número de espelhos e mantendo a abertura do concentrador constante, a largura de cada espelho é inversamente proporcional ao total de espelhos. Com espelhos de larguras reduzidas, as regiões de perda por rejeição por espelho também diminuem e, conseqüentemente, a região total de perdas do concentrador é menor.

Através da ferramenta de traçado de raios (do inglês, ray tracing), SolTrace (WENDELIN, 2003), foi possível avaliar o desempenho do CLFA em termos do  $\gamma$ , incluindo a região de perda por sombreamento secundário, começando com a inclusão de 72 segmentos primários (36 de cada lado do concentrador).  $\gamma$  é representado graficamente em função do raio do tubo absorvedor,  $R_{abs}$ , na Figura 8, onde uma distribuição de brilho solar gaussiana e  $\theta_s = 9$  mrad foram usados. A concentração geométrica é

$$C = \frac{r_{pmax}}{\pi R_{abs}} \quad (22)$$

na qual  $r_{pmax}$  é o ponto referente à borda direita do último espelho alocado no primário.

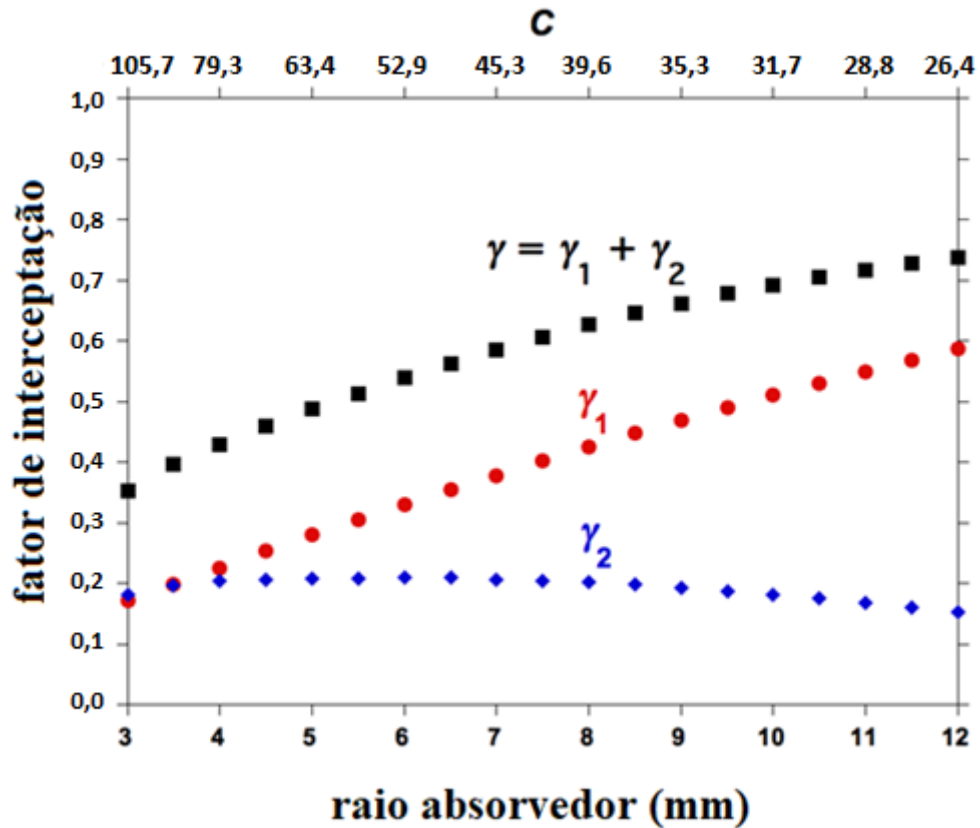
Para perspectiva, PTCs comerciais convencionais com  $C$  na faixa de 22,7 a 26,2,  $\gamma$  pode alcançar valores entre 0,89 e 0,93 (MANIKANDAN et al., 2019). A tendência esperada de  $\gamma$  aumentando com  $R_{abs}$  (ou seja, diminuindo  $C$ ) é quantificada na Figura 9.

Os resultados resumidos na Figura 9 confirmam o valor da substituição do primário do aplanático original por espelhos planos segmentados,  $\gamma = 0,74$  com  $C = 26,43$ . Calculou-se também que as perdas para o solo neste caso são de 7% da energia total que ingressa na abertura do concentrador. Também observa-se uma escassa participação do secundário, com  $\gamma_2$  muito menor que  $\gamma_1$ .

Contudo, a grande quantidade de espelhos dificulta a construção e a montagem do concentrador, tendo em vista que cada espelho deve ser posicionado inicialmente com alturas e inclinações diferentes. Além disso, 72 eixos para o rastreamento dos espelhos contribuem

para o aumento significativo dos custos do concentrador. Isso motiva a avaliação de projetos CLFA mais práticos, com menos espelhos primários, todos na mesma altura perto do nível do solo.

Figura 9 – Fator de Interceptação do CLFA em função do raio absorvedor (e de C) para um primário com 72 espelhos planos. Os parâmetros do aplanático são  $s = -0,9$  e  $K = -0,1$ .



Fonte: O autor (2022).

#### 4.1.3 CLFA com espelhos primários cilíndricos que seguem a geometria do primário do aplanático e derivação teórica do raio de curvatura

Tendo em vista as dificuldades práticas observadas no concentrador linear Fresnel aplanático com 72 segmentos primários planos, partiu-se para o estudo da deformação dos espelhos.

A largura dos espelhos planos é consideravelmente maior que o diâmetro do tubo absorvedor, fazendo com que uma parte dos raios refletidos seja perdida. Devido a isso, os espelhos podem ter uma pequena curvatura com o objetivo de aumentar a eficiência óptica (LARA et al., 2013).

A deformação dos espelhos pode ser feita com base em dois perfis: parabólico ou cilíndrico. A deformação parabólica aplica-se perfeitamente às tecnologias ópticas pois, por definição, todos os raios que incidem perpendicularmente à abertura são refletidos para o foco da parábola. Entretanto, é difícil obter um perfil parabólico. Os resultados ópticos são excelentes, porém os custos para fabricação são elevados.

Existem duas formas de se obter o espelho parabólico. Uma opção é fabricá-lo já no formato desejado. Esta opção geralmente é descartada pois implica em custos mais elevados. Outra opção consiste em deformar mecanicamente um espelho plano sobre um padrão pré-fabricado com o perfil parabólico. Neste caso, os espelhos devem ter a menor espessura possível, e, portanto, são frágeis e de difícil manutenção (PULIDO-IPARRAGUIRRE et al., 2019).

Do ponto de vista óptico, espelhos cilíndricos não são tão precisos quanto os parabólicos. Contudo, apresentam vantagens práticas. Com esta geometria, a concentração dos raios é obtida quando a distância do espelho ao absorvedor é consideravelmente maior que a largura do espelho (PULIDO-IPARRAGUIRRE et al., 2019).

Quanto maior for o número de espelhos inseridos no primário, menor será a razão entre a largura de cada espelho e o raio de curvatura cilíndrica. Caso a construção do espelho cilíndrico seja a partir de um espelho plano, a deformação necessária será tão pequena quanto esta razão.

Contudo, o problema da inserção de uma grande quantidade de espelhos já foi descrito anteriormente. Desta forma, testes foram feitos considerando um número praticável de espelhos, que possibilitem um bom desempenho do concentrador.

Inicialmente, os testes com espelhos com deformação cilíndrica em substituição aos espelhos planos localizados no primário do concentrador linear Fresnel aplanático foram feitos para  $N_e = 6$ , isto é, 12 espelhos cilíndricos inseridos no primário. A curvatura cilíndrica ideal para cada espelho foi obtida através de vários testes utilizando traçado de raios.

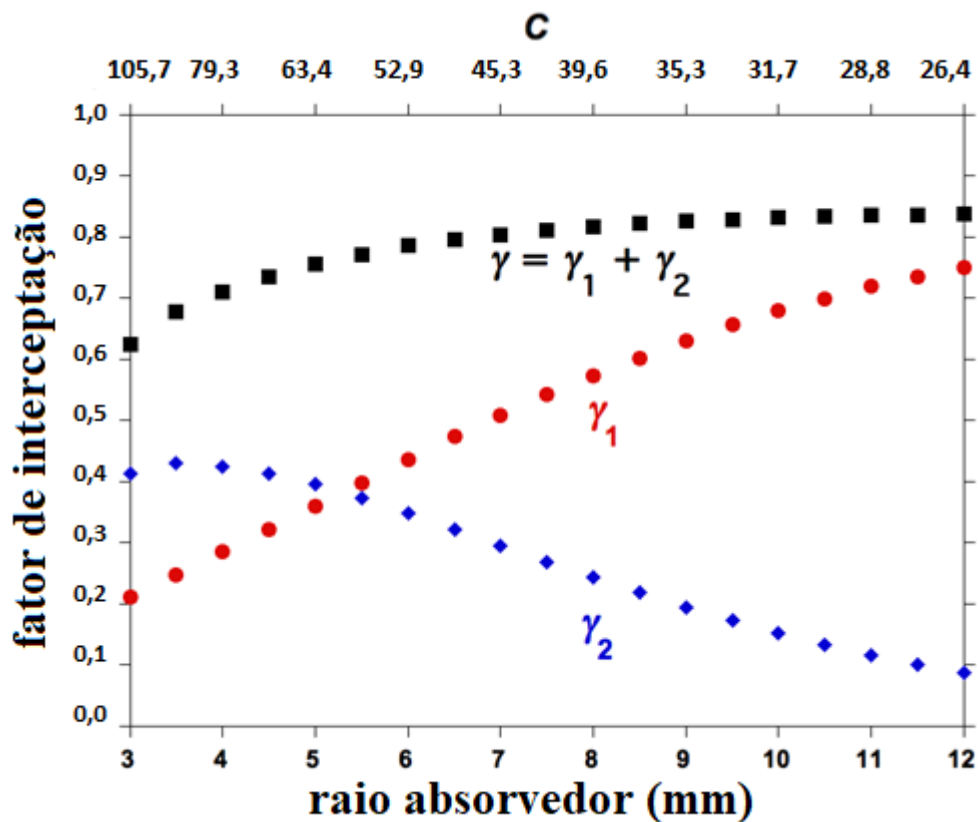
O resultado parcial mostrado na Figura 10 tem 12 segmentos de espelhos primários cilíndricos. A curvatura para cada espelho que maximiza  $\gamma$  para um determinado  $R_{abs}$  foi calculada com base nos raios de curvatura de cada segmento  $i$ ,  $R(i)$ , mostrado na Figura 11 expresso como:

$$R(i) = F \sqrt{(x_s(i) - x_p(i))^2 + (r_s(i) - r_p(i))^2} \quad (23)$$

na qual  $F$  é um fator de multiplicação que pode variar acima de 1, em incrementos de 0,025. Para cada valor de  $R_{\text{abs}}$ , através de diversos testes utilizando traçado de raios, foi encontrado o valor de  $F$  que maximiza  $\gamma$ .

Os resultados para  $\gamma$  em função de  $R_{\text{abs}}$  (e, portanto,  $C$ ) são mostrados na Figura 10. Por exemplo, em  $R_{\text{abs}} = 12$  mm (correspondente a  $C = 26,43$ ),  $F = 1,9$  produziu  $\gamma$  máximo de 0,84, que é 10% superior ao CLFA com 72 espelhos planos compondo o primário. Esta considerável redução no número de espelhos primário motiva a derivação analítica que segue para cálculo das curvaturas cilíndricas mais apropriadas de cada espelho. Além disso, o valor de  $\gamma_2$  bastante menor que  $\gamma_1$ , sugere a necessidade de analisar o espaço paramétrico em regiões onde o secundário é mais utilizado, possivelmente com desempenho superior do concentrador.

Figura 10 – Fator de Intercepção quando 12 espelhos cilíndricos compõem o primário. Parâmetros do aplanático são  $s = -0,9$ ,  $K = -0,1$  e  $F = 1,9$ .

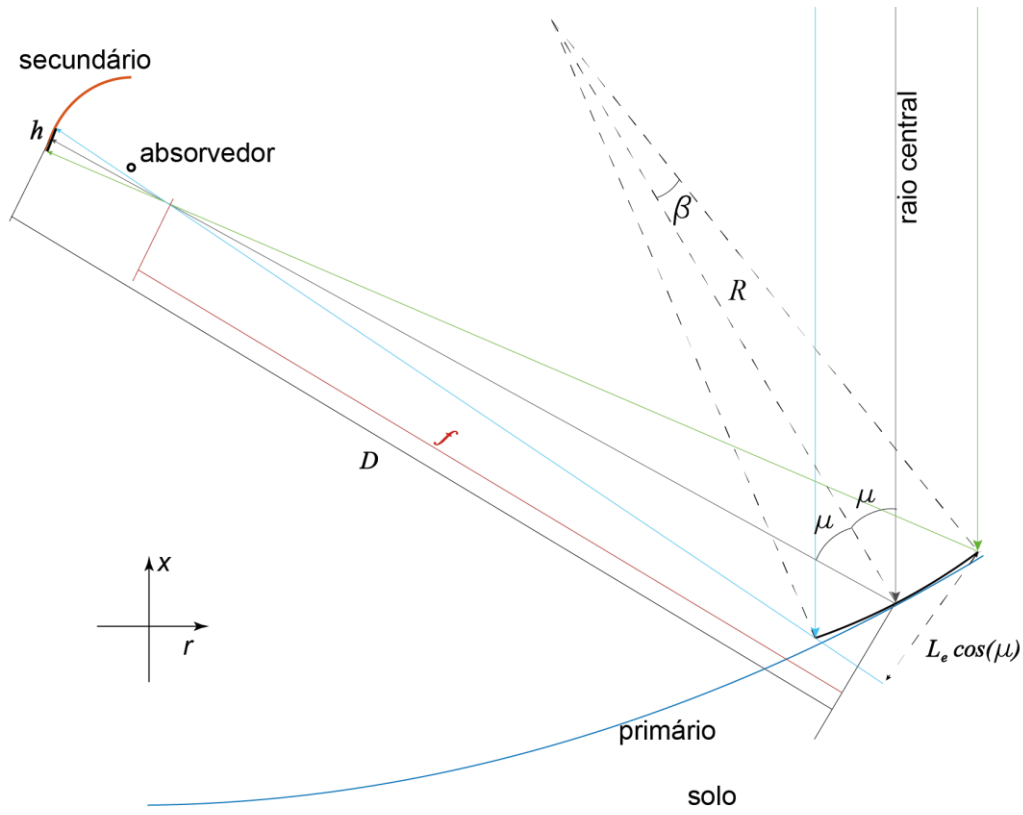


Fonte: O autor (2022).

Para casos de interesse prático, o raio de curvatura  $R$  de cada segmento do espelho primário é muito maior que sua largura  $L_e$ . Na Figura 11,  $D$  é a distância do centro do

segmento do espelho primário ao ponto correspondente no secundário, e  $h$  é a largura da imagem formada no secundário.

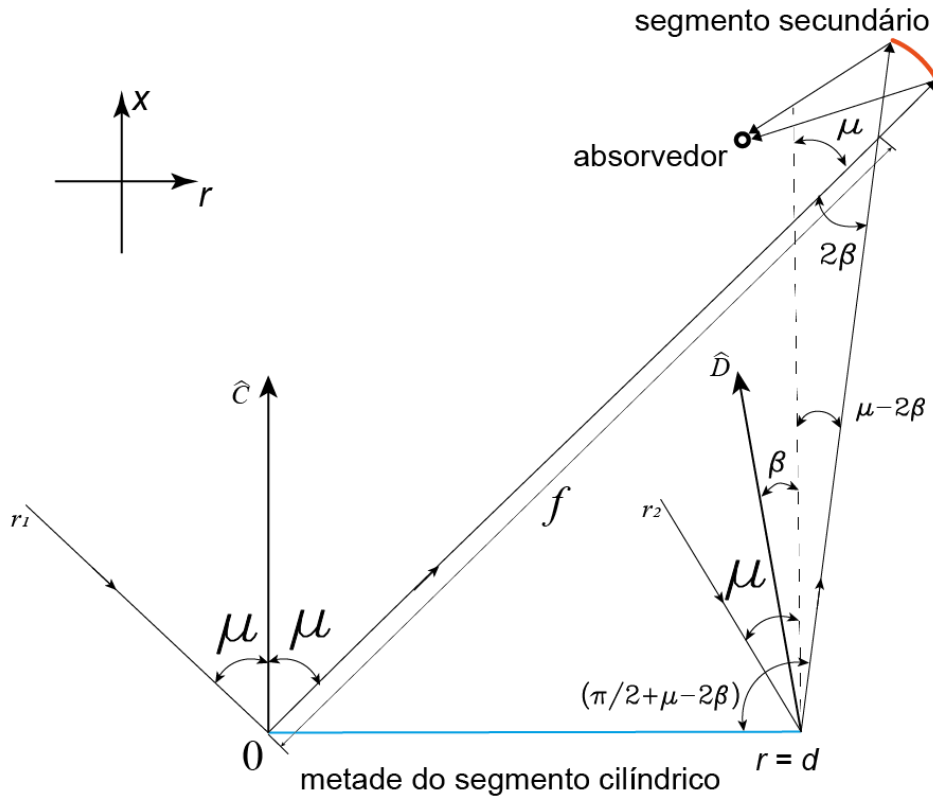
Figura 11 – Segmento cilíndrico posicionado no primário original.



Fonte: O autor (2022).

Para definição de equações matemáticas que possibilitem a obtenção do raio de curvatura otimizado de cada espelho, a descrição geométrica apresentada na Figura 12 foi utilizada. Nela, um feixe de raios colimados incidentes no espelho cilíndrico,  $r_1$ , formam um ângulo,  $\mu$ , com a normal,  $\hat{C}$ , localizada no centro do espelho. Um segundo raio,  $r_2$ , incide à uma distância  $d$  do centro do espelho, onde um vetor normal  $\hat{D}$  faz um ângulo  $\beta$  com a normal  $\hat{C}$ .

Figura 12 – Alargamento mostrando a projeção transversal de dois raios incidindo no ponto médio e na borda direita do segmento cilíndrico.



Fonte: O autor (2022).

Apenas o raio que atinge o ponto médio do segmento primário acaba sendo focado precisamente no centro do tubo absorvedor após a reflexão do secundário. Portanto,  $\gamma$  piora à medida que  $d$  aumenta. Todos os outros raios resultam numa propagação da imagem do Sol em torno do foco. Alguns desses raios atingem o tubo absorvedor, outros não o atingem e compõem parte das perdas por rejeição.

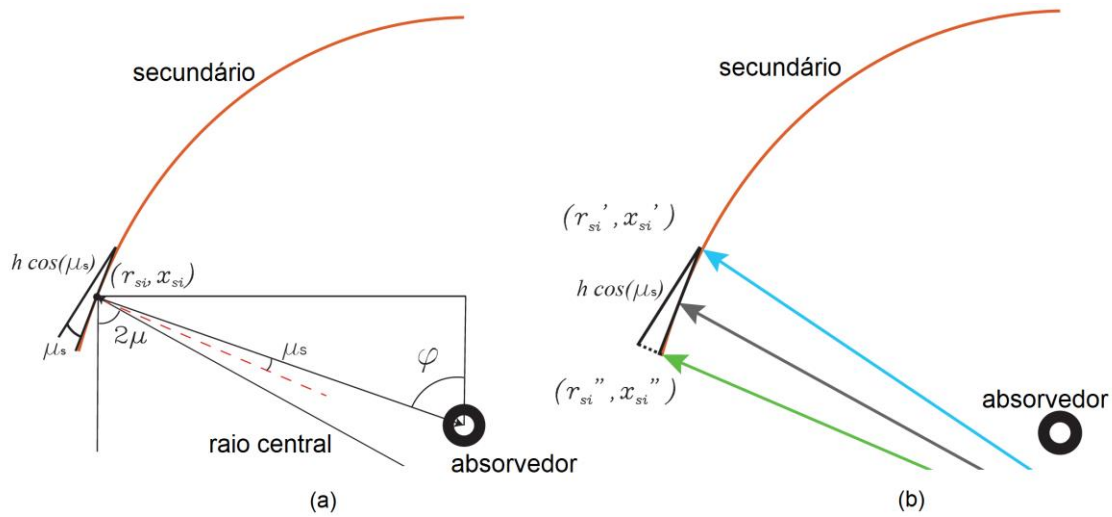
Considera-se que a distância,  $d$ , é pequena comparada ao raio de curvatura cilíndrica,  $R$ , e, como a curvatura dos espelhos será pequena, o deslocamento vertical (na direção  $\hat{z}$ ) no ponto  $x = d$  pode ser negligenciado (RABL, 1985). Com o objetivo de calcular a distância focal,  $f$ , é possível delimitar um triângulo a partir de três pontos: o ponto 0 do sistema descrito, o ponto  $x = d$  e o ponto de intersecção entre os raios refletidos  $r_1$  e  $r_2$ .

A lei dos senos aplicada a este triângulo nos fornece a relação:

$$\frac{d}{\sin(2\beta)} = \frac{f}{\sin(\frac{\pi}{2} + \mu - 2\beta)} \quad (24)$$

A Figura 11 ilustra as outras variáveis de interesse. A variável  $D$  corresponde à distância do centro do espelho ao secundário.  $L_e$  é a largura do espelho,  $h$  é a largura da imagem formada no secundário. Para que as aproximações sejam válidas,  $R$  deve ser muito maior que  $L_e/2$ , e observando a geometria aplanática, e o distanciamento entre o primário e secundário, vê-se que esta condição é satisfeita. O termo  $h \cos(\mu_s)$  pode ser obtido analisando a Figura 13.

Figura 13 – Detalhes da imagem formada no secundário: (a) inclinação da imagem formada no secundário; (b) pontos onde os raios refletidos pelas bordas dos espelhos cilíndricos interceptam o secundário, delimitando a largura  $h$  da imagem formada.



Fonte: O autor (2022).

O ângulo  $\mu_s$  representa a inclinação da imagem no secundário para a qual o raio central incidente é refletido para o absorvedor, e pode ser calculado fazendo:

$$\mu_s = \frac{\varphi - 2\mu}{2} \quad (25)$$

na qual,  $\varphi$  representa o ângulo de saída do raio central refletido no secundário que alcança o absorvedor.

Observando a Figura 12, e observando a equivalência de triângulos:

$$\frac{L_e \cos(\mu)}{f} = \frac{h \cos(\mu_s)}{D-f} \quad (26)$$

A relação  $f/L_e$  resulta em:

$$\frac{f}{L_e} = \frac{D \cos(\mu)}{L_e \cos(\mu) + h \cos(\mu_s)} \quad (27)$$

Da Equação 24:

$$\frac{L_e}{2 \sin(2\beta)} = \frac{f}{\sin(\frac{\pi}{2} + \mu - 2\beta)} = \frac{f}{\cos(-\mu + 2\beta)} \quad (28)$$

Desenvolvendo a função seno, obtém-se:

$$\frac{f}{L_e} = \frac{\cos(2\beta) \cos \mu + \sin(2\beta) \sin \mu}{2 \sin(2\beta)} = \cot(2\beta) \frac{\cos \mu}{2} + \frac{\sin \mu}{2} \quad (29)$$

Portanto, o valor de  $\tan(2\beta)$  pode ser obtido fazendo:

$$\tan(2\beta) = \frac{\cos \mu}{2} \frac{1}{\frac{f}{L_e} \frac{\sin \mu}{2}} \quad (30)$$

Desta forma, o raio do espelho cilíndrico, R, pode ser calculado através da expressão:

$$R = \frac{L_e}{2 \sin \beta} \quad (31)$$

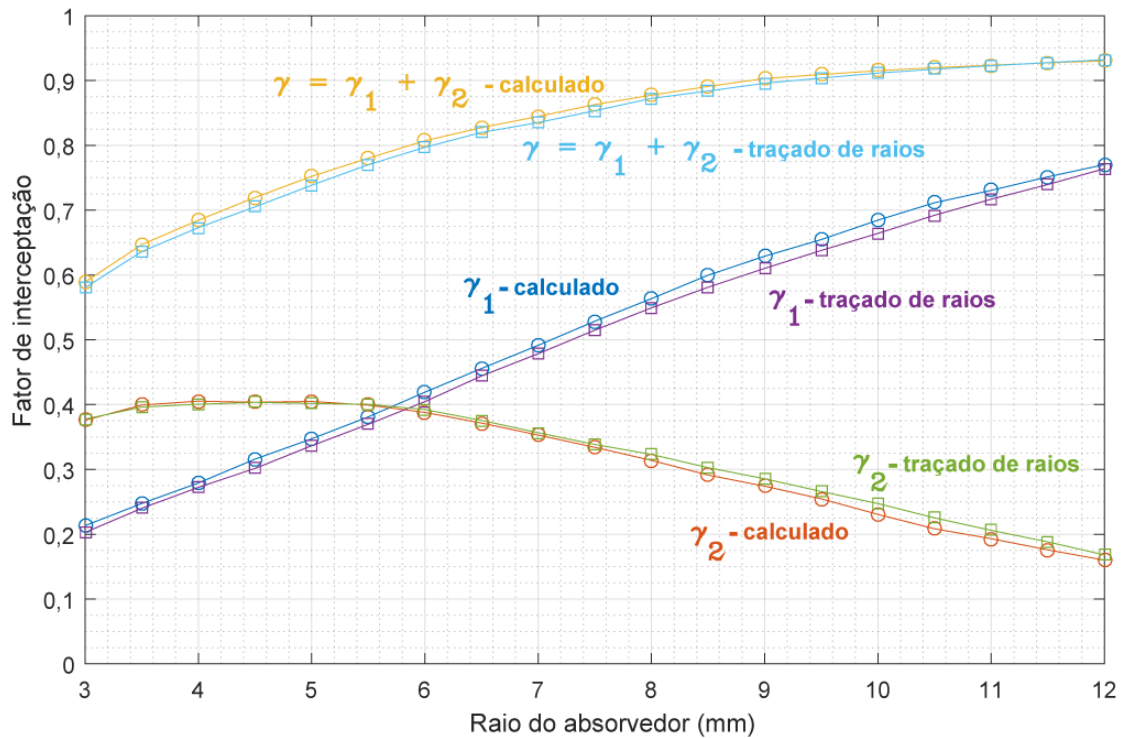
Executando a metodologia para cálculo do raio do espelho cilíndrico que maximiza o fator de interceptação, é possível obter as curvas mostradas na Figura 14. Este resultado parcial compara o fator de interceptação do concentrador com curvaturas cilíndricas otimizadas:

1. por meio de sucessivos testes com traçado de raios (do inglês, Ray Tracing), variando-se o valor de F (Equação 23) até obter as curvaturas que maximizam o fator de interceptação, e

2. por meio do método analítico descrito anteriormente (Equações 24-31).

Os valores de  $\gamma$  obtidos por traçado de raios para a curvatura cilíndrica prevista pela Equação 31 acima são ligeiramente superiores e concordam com os valores de  $\gamma$  obtidos com curvaturas otimizadas por tentativa e erro. Desta forma, este método analítico para cálculo das curvaturas cilíndricas dos espelhos primários será utilizado nos projetos CLFA apresentados a na Figura 14.

Figura 14 – Comparação entre o fator de interceptação obtido por meio do traçado de raios para curvaturas otimizadas por tentativa e erro e curvaturas cilíndricas previstas pelo método analítico descrito, considerando 12 espelhos cilíndricos seguindo a geometria do primário aplanático com parâmetros  $s = -0,9$  e  $K = -0,1$ .



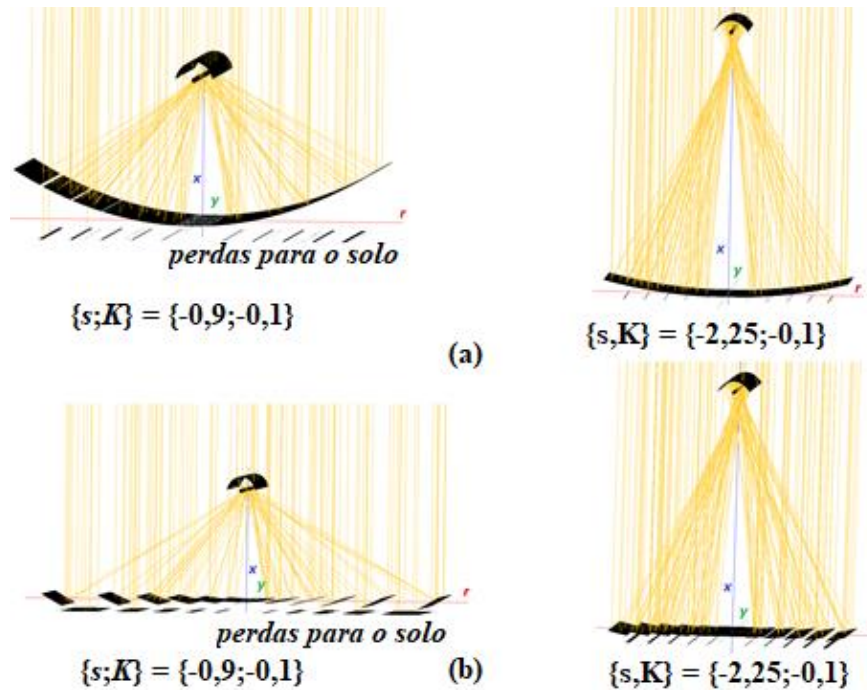
Fonte: O autor (2022).

#### 4.1.4 Transição do concentrador aplanático para sua versão Fresnel

Os resultados foram apresentados para segmentos primários que seguem a forma do aplanático original (Figura 15a). Agora, um outro cenário que insere mais uma vantagem prática ao projeto do concentrador é testada: todos os espelhos posicionados à mesma altura e próximos ao nível do solo (Figura 15b).

Neste cenário, a profundidade do refletor primário original, a partir do qual a versão Fresnel é gerada, torna-se um fator importante, pois impacta na abertura do concentrador, como mostrado na Figura 16. Isso, por sua vez, requer testes que considerem um espaço mais amplo de parâmetros  $s$  e  $K$ , podendo colocar o absorvedor e o secundário a uma altura maior, mas com o benefício de reduzir perdas ópticas. Apreciar plenamente este ponto obriga a definir como é feito o posicionamento dos espelhos primários.

Figura 15 – Concentrador linear Fresnel aplanático para parâmetros  $\{-0,9,-0,1\}$  e  $\{-2,25;-0,1\}$  para: (a) espelhos seguindo a geometria original, e (b) espelhos posicionados no plano horizontal.

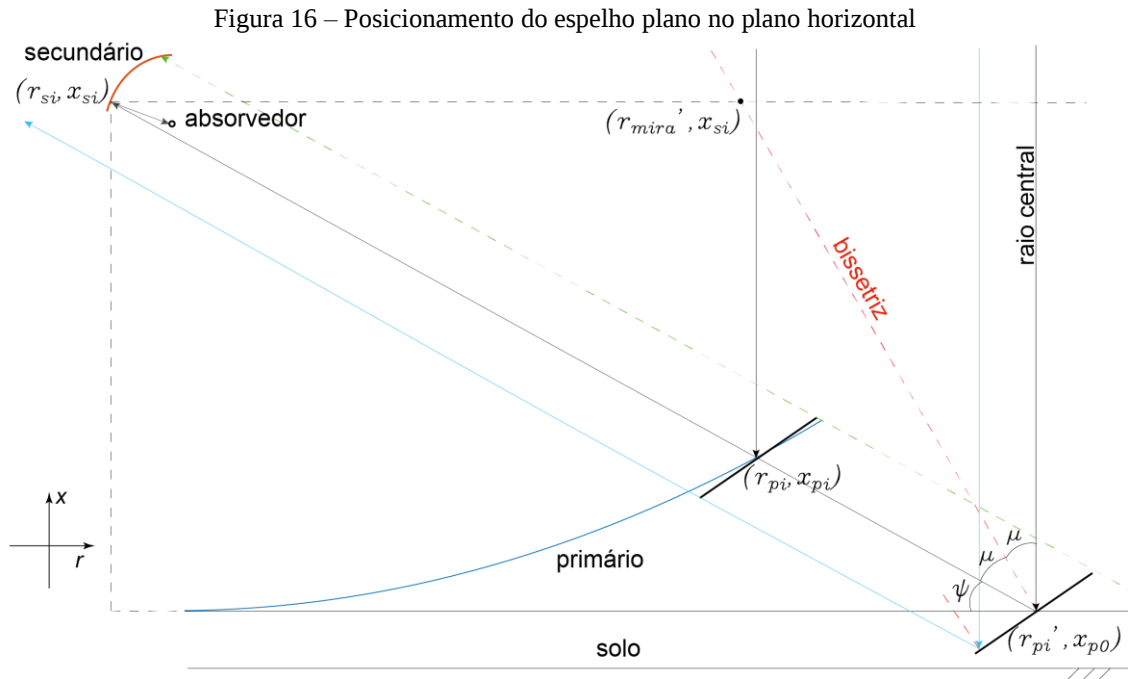


Fonte: O autor (2022).

Conforme mostrado na Figura 16, um raio que atinge um ponto no secundário deve chegar com o mesmo ângulo observado nos raios refletidos pelo primário aplanático original na incidência normal, para o qual já existe solução analítica (GORDON, 2010; GOMES et al., 2019).

O primário original é substituído por um campo de segmentos individuais, todos à mesma altura  $x_{p0}$ . A localização de cada segmento é obtida estendendo o raio solar transversal refletido do primário original até o ponto médio do espelho, inclinado de tal forma que assegure a reflexão de um raio com a mesma direção para o secundário. Apesar da diferença no posicionamento dos espelhos, a estratégia de rastreamento é a mesma apresentada anteriormente, com a diferença que  $x_{pi} = x_{p0}$  e  $r_{pi} = r_{pi}'$ .

A princípio, o posicionamento dos espelhos no plano horizontal foi feito como descrito para simplificar esta etapa de projeto, cujo objetivo principal é analisar a viabilidade do CLFA. No Cap. 5 é apresentada uma equação analítica que transforma todos os pontos sobre o primário original em pontos sobre o plano horizontal, resultando em projetos com percentuais de perdas para o solo parecidas, independentes do parâmetro  $s$  e  $K$ .



Fonte: O autor (2022).

## 4.2 RESULTADOS PARCIAIS

Esta seção apresenta os resultados parciais obtidos na primeira etapa do projeto. Os cenários com espelhos tangenciando o contorno primário e posicionados no plano horizontal foram testados. Variou-se o valor do parâmetro  $s$  de forma a obter primários mais próximos de um plano, favorecendo a conversão para a versão Fresnel do sistema.

### 4.2.1 Sensibilidade do fator de interceptação aos parâmetros $s$ e $K$

Para o concentrador aplanático de espelho duplo 2D de alto desempenho com  $s = -0,9$ ,  $K = -0,1$  e  $R_{\text{abs}} = 12$  mm, apresentado por (GOMES et al., 2019), a conversão para o CLFA com 12 espelhos primários cilíndricos à mesma altura (Figura 15b), incorre em perdas excessivas, principalmente perdas para o solo, que foram iguais a 34%. Isto, em grande parte, devido à profundidade relativamente alta do primário aplanático nestes parâmetros.

Seu fator de interceptação de  $\gamma = 0,56$  ficou bem abaixo do  $\gamma = 0,84$  para o CLFA correspondente com espelhos primários posicionados ao longo do primário original. Portanto, foi necessário explorar geometrias aplanáticas com um primário mais raso e, portanto, perdas para o solo menores, variando os valores de  $s$  e  $K$ .

Analisando a figura e as equações que descrevem o aplanático (Equações 14-17 e Figura 7), aumentar os valores de  $K$  em módulo resulta no aumento da abertura do concentrador secundário (e, portanto, aumento das perdas por sombreamento secundário). Caso  $s$  aumente em módulo, haverá a diminuição da profundidade do primário e a consequente redução das perdas para o solo.

Desta forma, considerando que o objetivo de projeto nessa etapa foi reduzir as perdas para o solo, identificadas como o principal motivo da diminuição do fator de interceptação, sem que isso incorresse em maior percentual de perdas por sombreamento secundário, manteve-se o valor de  $K$  constante,  $\phi_{\max} = 85^\circ$  e variou-se  $s$  em busca de primários mais próximos de um plano, que favorecessem a conversão para a versão Fresnel do sistema.

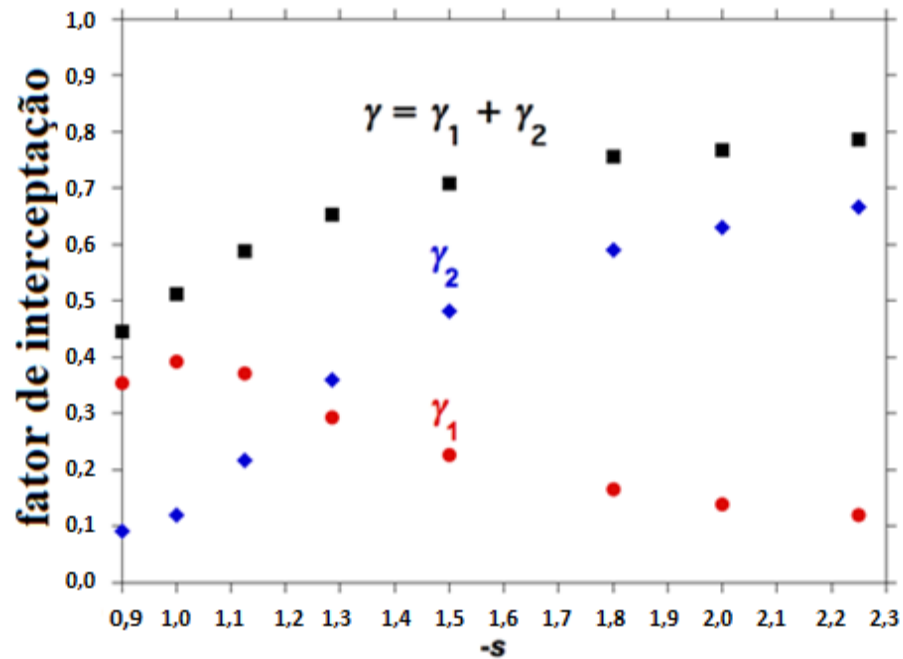
Para o cenário no qual os espelhos primários seguem o contorno primário original,  $\gamma = 0,84$  pode ser alcançado com  $C = 26$ . Assim, a busca por possíveis valores de  $s$  que maximizem o  $\gamma$  nesse cenário não é apresentada, já que os ganhos observados não excederam 3% quando espelhos planos são utilizados, e 1% quando utiliza-se espelhos cilíndricos.

No entanto, os grandes ganhos potenciais para o CLFA com espelhos primários posicionados à mesma altura mereceram investigação. Com o objetivo de maximizar  $\gamma$ , manteve-se o valor de  $K = -0,1$ ,  $\phi_{\max} = 85^\circ$  e variou-se  $s$ , com o melhor desempenho para  $s = -2,25$  (Figura 19).

#### **4.2.2 Resultados para o CLFA com espelhos primários à mesma altura**

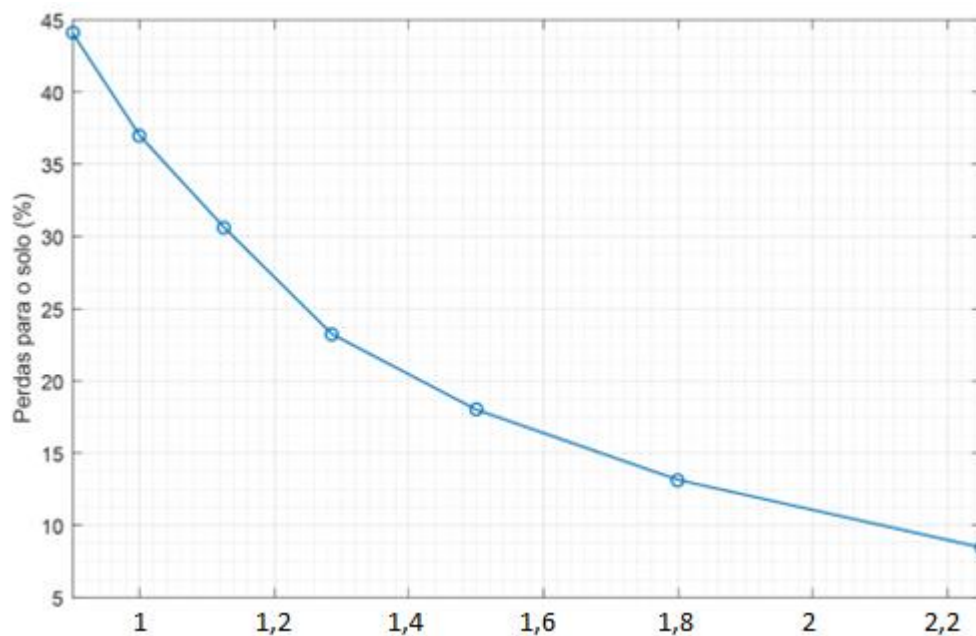
Os resultados foram obtidos considerando uma distribuição de brilho solar Gaussiana,  $\theta_s = 9$  mrad e  $R_{\text{abs}} = 12$  mm. Para o CLFA com 72 espelhos primários planos, a Figura 17 mostra a melhoria em  $\gamma$  à medida que  $s$  varia, com a maior parte do benefício derivando de perdas para o solo mais baixas.  $\gamma = 0,48$  para o projeto inicial com  $s = -0,9$  onde as perdas de solo são 42%, aumentando para  $\gamma = 0,79$  em  $s = -2,25$ , onde as perdas para o solo são reduzidas a 7%.

Figura 17 – Fator de interceptação do CLFA como função do parâmetro  $s$  para 72 espelhos planos primários posicionados no plano horizontal, variando-se o valor de  $s$  e fixando  $K = -0,1$ .



Fonte: O autor (2022).

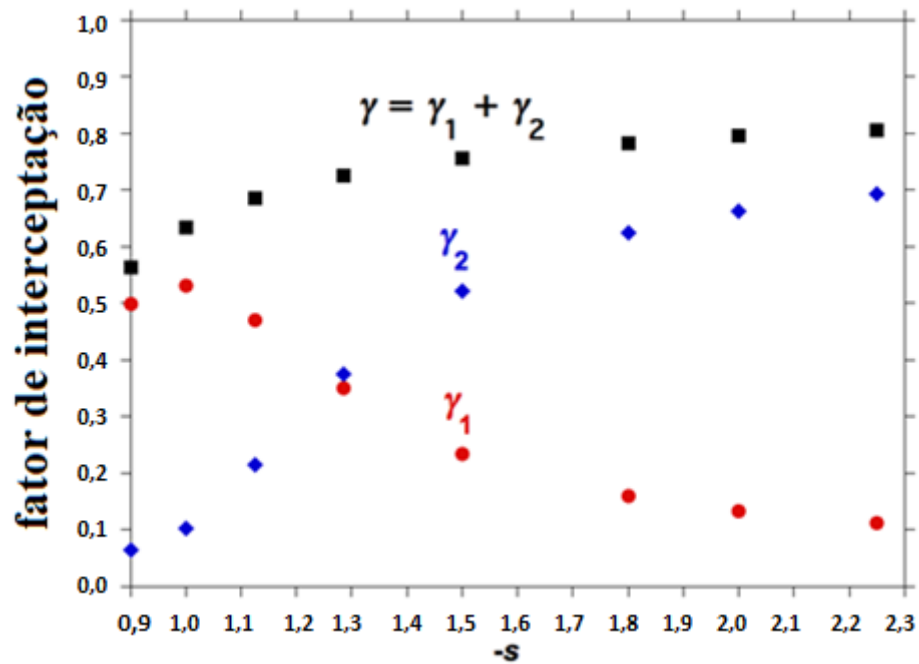
Figura 18 – Perdas para o solo em função de  $s$  para 72 espelhos planos posicionados no plano horizontal, variando-se o valor de  $s$  e fixando  $K = -0,1$ .



Fonte: O autor (2022).

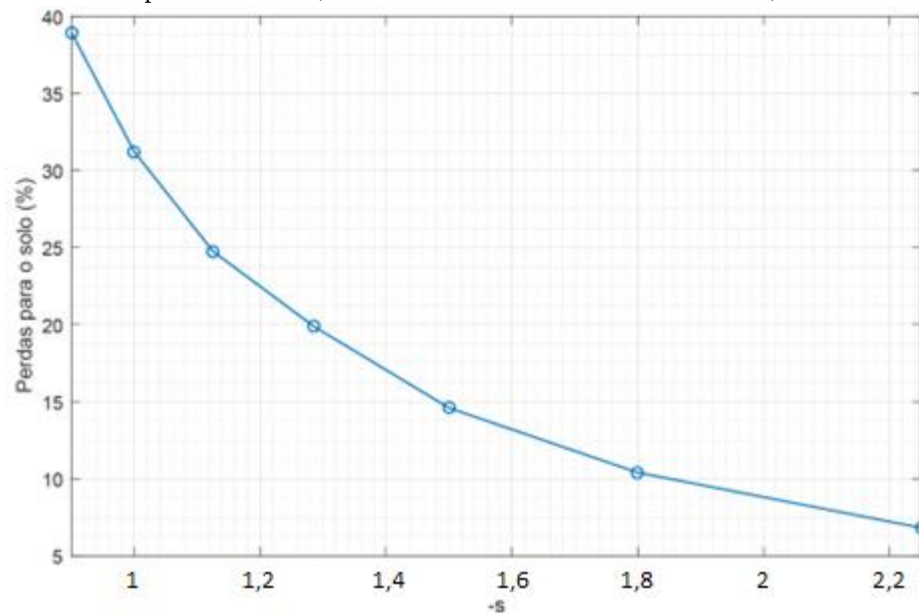
Uma simulação semelhante foi realizada para 12 espelhos primários cilíndricos, com resultados apresentados na Figura 19, com  $\gamma = 0,81$  (com perdas para o solo de 6%) sendo alcançado em  $s = -2,25$ .

Figura 19 – Fator de interceptação como função do parâmetro  $s$  para 12 espelhos cilíndricos seguindo a geometria do primário, variando-se o valor de  $s$  e fixando  $K = -0,1$ .



Fonte: O autor (2022).

Figura 20 – Perdas para o solo em função de  $-s$  para  $N_e = 12$  espelhos cilíndricos posicionados no plano horizontal, variando-se o valor de  $s$  e fixando  $K = -0,1$ .



Fonte: O autor (2022).

As Figs. 17 e 19 também ilustram como a contribuição dominante para  $\gamma$  pode mudar de reflexão simples para raios de reflexão dupla à medida que o parâmetro  $s$  é variado.

#### 4.2.3 Perdas ópticas adicionais associadas aos ângulos de incidência projetados

Até aqui, todas as avaliações foram realizadas considerando a incidência normal dos raios solares. Uma avaliação realista, no entanto, deve incluir estimativas das perdas decorrentes da variação de ambos os ângulos de incidência projetados (transversal,  $\theta_t$ , e longitudinal,  $\theta_L$ ).

A melhor configuração do CLFA para a incidência normal com espelhos primários no plano horizontal,  $s = -2,25$  e  $K = -0,1$ , foi a escolhida para a observação da variação dos ângulos de incidência projetados. Primeiro, no entanto, confirmou-se que tal variação não afeta a melhor escolha dos parâmetros de projeto ou a melhor curvatura dos espelhos primários cilíndricos.

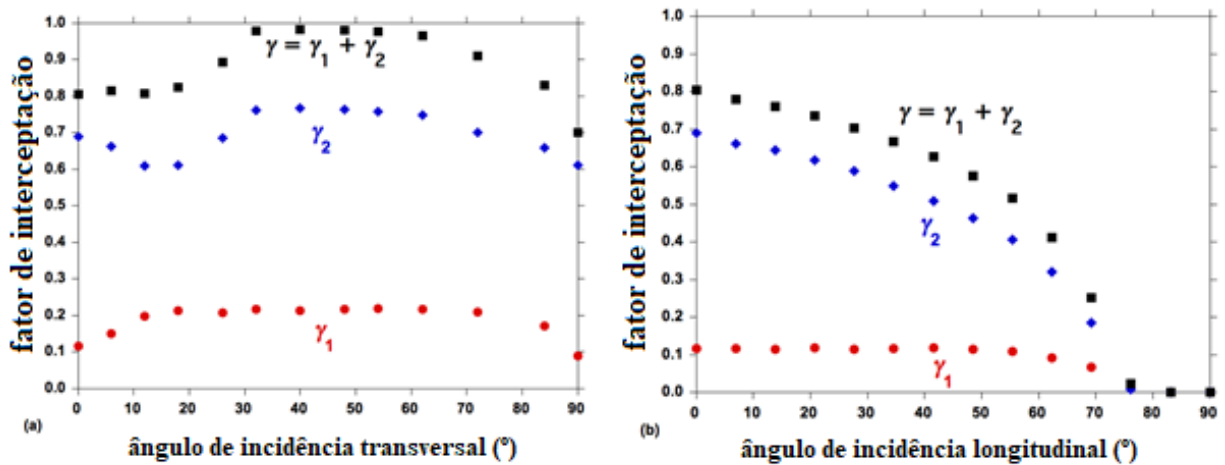
Os resultados do traçado de raios são apresentados na Figura 21 e mostra como  $\gamma$  varia em função de  $\theta_t$  e  $\theta_L$  para o CLFA escolhido. Observa-se a prevalência de  $\gamma_2$  sobre  $\gamma_1$ , ou seja, a efetiva participação do concentrador secundário. A Figura 21a mostra que, à medida que  $\theta_t$  aumenta, há uma diminuição de  $\gamma_2$  e um aumento de  $\gamma_1$ , somando-se a um aumento no fator de interceptação total  $\gamma$ . Este efeito ocorre em grande parte devido às perdas para o solo e perdas por sombreamento secundário que desaparecem para  $\theta_t > 30^\circ$ , até que, para valores de  $\theta_t > 40^\circ$ ,  $\gamma$  começa a cair e atinge seu valor mínimo de 0,71 em  $\theta_t = 90^\circ$ .

Invariavelmente, a diminuição perceptível de  $\gamma$  nos maiores valores de  $\theta_t$  não se traduz em perdas consideráveis na coleta média anual de energia, pois a quantidade de radiação que ingressa na abertura do concentrador é consideravelmente menor para as horas do dia correspondentes a esses ângulos.

A Figura 21b mostra o efeito da variação de  $\theta_L$ . Os valores apresentados, obtidos através do traçado de raios. Isso evita que as perdas transversais para  $\theta = 0$  sejam contabilizadas duas vezes. Percebe-se que o efeito de  $\theta_L$  é visivelmente mais forte, como esperado para todos os concentradores solares de foco linear (RABL, 1985; ZHU, 2013). De fato, a dependência angular mostrada na Figura 21 é compatível com a observada nos LFRs convencionais (ZHU, 2013). Isso se deve, principalmente, ao tamanho finito do refletor secundário, bem como ao fato de que ele e o absorvedor são estacionários. O efeito é mais forte do que o observado nos concentradores de calha parabólica, onde o absorvedor se move junto com os espelhos primário. Os resultados apresentados na Figura 21 podem ser utilizados

em estudos futuros para locais específicos, que exigem a convolução dessas funções com a radiação solar instantânea.

Figura 21 – Fator de interceptação em função da projeção (a) transversal e (b) longitudinal do ângulo de incidência para CLFA com 12 espelhos cilíndricos posicionados no plano horizontal. Parâmetros aplanáticos são  $\{-2,25; -0,1\}$ .



Fonte: O autor (2022).

### 4.3 CONCLUSÕES PARCIAIS

A vasta literatura disponível determina que todo LFR tem espelhos primários que rastreiam o Sol de modo a concentrar energia num foco linear, e que pode introduzir algum espelho secundário não formador de imagem para evitar perda por dispersão excessiva (PRASAD et al., 2017; ZHU, 2013; COLLARES-PEREIRA et al., 2017; BELLOS, 2019). Nesse contexto, a implementação de concentradores Fresnel aplanáticos mostrava-se difícil pois remover duas ordens de aberração geométrica não tem solução apenas ajustando a geometria do espelho secundário, único grau de liberdade até então identificado.

Como apresentado, a geometria aplanática pode remover a aberração esférica e o coma, já que conta com dois parâmetros,  $s$  e  $K$ , que realizam esse ajuste. Um grau de liberdade adicional decorre do reconhecimento que a estratégia de rastreamento do campo de espelhos primários é um grau de liberdade que permite ao concentrador Fresnel aplanático apresentar uma geometria formadora de imagem de boa precisão.

Em seguida, definiu-se, portanto, como o posicionamento e o rastreamento para cada refletor primário Fresnel devem ser feitos. Ao invés de um primário e secundário que produzem separadamente um foco, a focagem é uma consequência da ação óptica combinada

dos espelhos primários e secundários. Desta forma, o CLFA representa um novo conceito para concentradores solares lineares de alto desempenho com óptica focalizante.

Dois cenários de projeto para o CLFA foram analisados, onde os espelhos primários (1) seguem o primário aplanático original e (2) estão todos à mesma altura, num plano horizontal. O primeiro atinge maiores  $\gamma$  como consequência de menores perdas por bloqueio e para o solo, e o segundo é mais praticável e de menor custo. A avaliação completa que mostra  $\gamma$  em função de ambos os ângulos de incidência projetados (transversal e longitudinal) é fornecida para o campo de espelhos primários nivelados à mesma altura, que é mais condizente com o que se espera, em termos operacionais e construtivos, de um LFR.

Outra escolha chave foi relacionada à forma dos espelhos primário. Segmentos planos são mais simples, mas produzem um  $\gamma$  mais baixo para uma determinada concentração, em contraste com segmentos primários com curvatura cilíndrica. A principal vantagem dos espelhos curvos é a capacidade de reduzir significativamente o número de segmentos para determinados valores de  $\gamma$  e  $C$ , simplificando o concentrador. As soluções analíticas para a curvatura cilíndrica foram satisfatórias e o desempenho óptico do concentrador para o caso com 12 espelhos cilíndricos ( $\gamma = 0,84$  com  $C = 26,43$ ) se mostrou superior ao projeto com 72 espelhos planos ( $\gamma = 0,74$  com  $C = 26,43$ ).

Como os ganhos ópticos médios anuais dependem do clima e da latitude, a otimização dos projetos do CLFA será específica para cada caso. Em vez disso, objetivou-se fornecer as ferramentas analíticas para avaliar o desempenho óptico dos CLFA em qualquer situação.

Para determinadas condições exigidas de temperatura de operação do campo de coletores e da turbina, a avaliação vital para decidir entre diferentes projetos é a eficiência óptica do concentrador solar, juntamente com as questões práticas de custo, instalação, operação e manutenção. Desta forma, o restante da usina solar térmica (ou seja, análise térmica do coletor e desempenho do bloco de potencia) não é abordado aqui e fica, portanto, delegada para estudos futuros.

A identificação de projetos CLFAs que maximizam  $\gamma$  para configurações práticas requer o levantamento das combinações  $\{s, K\}$  do aplanático. As escolhas iniciais foram guiadas pelos resultados de Gomes et al. (2019). Elas funcionam bem para os CLFAs onde os espelhos primários seguem a forma do primário original. No entanto, para CLFAs com todos os espelhos primários à mesma altura no plano horizontal, foi necessária uma sondagem adicional substancial, tendo o projeto com  $s = -2,25$  e  $K = -0,1$  o melhor desempenho óptico.

Estreitar o campo de combinações possíveis de  $s$  e  $K$  que resultou na fixação do parâmetro  $K = -0,1$  e  $\varphi_{\max} = 85^\circ$  foi baseado em análises na incidência normal. Mas as perdas consideráveis inerentes às variações do ângulo de incidência transversal e longitudinal precisam ser avaliadas quando se calcula o desempenho médio anual, e novas combinações  $s$  e  $K$  podem ser mais promissoras. Assim, a dependência angular de  $\gamma$  foi calculada e apresentada, e as curvas obtidas são compatíveis com o que se observa nos concentradores solares de foco linear convencionais.

## 5 DESENVOLVIMENTO ANALÍTICO DOS MECANISMOS DE PERDAS DO CONCENTRADOR LINEAR FRESNEL APLANÁTICO

Os resultados do traçado de raios para os projetos práticos do CLFA apresentados no Cap. 4 mostraram que um fator de interceptação de 0,81 pode ser alcançado na razão de concentração geométrica mais alta ( $C \approx 26$ ) usada em PTCs convencionais onde os fatores de interceptação podem atingir aproximadamente 0,9 (MANIKANDAN et al., 2019).

No entanto, devido ao tempo de computação substancial e à natureza iterativa de tentativa e erro da avaliação de CLFAs, apenas um levantamento bastante limitado do espaço expansivo de parâmetros aplanáticos  $\{s, K\}$  foi explorado no capítulo anterior.

### 5.1 METODOLOGIA

Nesta seção, uma metodologia para obter soluções inteiramente analíticas que configurem uma ferramenta para quantificar cada perda óptica em função da variação dos ângulos de incidência projetados, dispensando o traçado de raios, é apresentada.

#### 5.1.1 Perdas ópticas típicas dos concentradores lineares Fresnel

As perdas ópticas associadas ao CLFA discutidas aqui e observadas em qualquer LFR são:

1. perdas por bloqueio (dos raios refletidos pelo espelho primário pela parte de trás de um espelho adjacente) (SHARMA et al., 2015 e YANG et al., 2018),
2. perdas para o solo (raios que incidem entre os espelhos primários e atingem o solo) (Oliveira et al., 2015),
3. sombreamento do primário pelo secundário,
4. dispersão (raios refletidos do primário que não entram na abertura do secundário), e
5. rejeição de raios (raios refletidos pelo secundário que não atingem o tubo absorvedor) (ZHU, 2013 e SANTOS et al., 2021).

Parte dessas perdas foram brevemente discutidas no Cap. 4. Os resultados analíticos derivados aqui para avaliação dessas perdas no CLFA são igualmente válidos para qualquer LFR para as quatro primeiras categorias. A rejeição de raios dentro do concentrador secundário, no entanto, é específica para a geometria aplanática, de modo que os resultados obtidos aqui não podem ser generalizados para outros projetos secundários.

Uma categoria adicional de perda é o efeito de borda (do inglês, end losses), ou seja, raios que interceptam o espelho primário, mas, no plano longitudinal, são refletidos além da extremidade do absorvedor. A modelagem dessas perdas é apresentada por (HEIMSATH et al., 2014) e (HONGN et al., 2015). Em sistemas comerciais de grande escala, com fileiras de concentradores lineares cujo comprimento é consideravelmente maior que a largura da abertura de entrada, o efeito de borda é quase insignificante. Contudo, ele serve para calcular o fator de interceptação longitudinal apresentado na Seção 5.6.

Para quantificação das perdas em função da variação do ângulo  $\theta_i$ , elas foram divididas em duas classes: (1) perdas na região dos raios incidentes e (2) perdas na região dos raios refletidos. Perdas para o solo, pelo sombreamento secundário são contabilizadas a partir dos **raios incidentes**. Bloqueio, efeito de borda, dispersão e rejeição de raios a partir dos **raios refletidos**.

Os resultados analíticos derivados nas próximas seções para cada mecanismo de perda óptica são expressos em função dos ângulos de incidência projetados. A radiação solar incidente é uma fonte estendida que pode ser caracterizada por seu semiângulo  $\theta_s$ , valor RMS baseado na convolução do disco solar (4,7 mrad) com as funções de distribuição probabilística de imprecisões no contorno do espelho, especularidade, alinhamento e rastreamento (RABL, 1985). O semiângulo de abertura total  $\theta_s = 9$  mrad está em consonância com análises disponíveis na literatura (Gee et al., 2010; Gomes et al., 2019). Concentradores com este semiângulo de abertura para a radiação incidente serão avaliados nas seções 5.6 e 6.

Para validação das modelagens analíticas, simulações de traçamento de raios, utilizando o SolTRACE (WENDELIN, 2003), foram realizadas para cada projeto avaliado analiticamente.

### 5.1.2 Cálculo das perdas ópticas individuais via traçado de raios

A metodologia empregada para execução desse capítulo consistiu em duas etapas:

1. Implementação de simulações computacionais de traçado de raios através do SolTrace (Wendelin, 2003) para quantificar as perdas ópticas do concentrador, e
2. Dedução de expressões analíticas que descrevem as perdas associadas ao CLFA com base em informações geométricas do sistema, que puderam ser validadas com os resultados da etapa anterior.

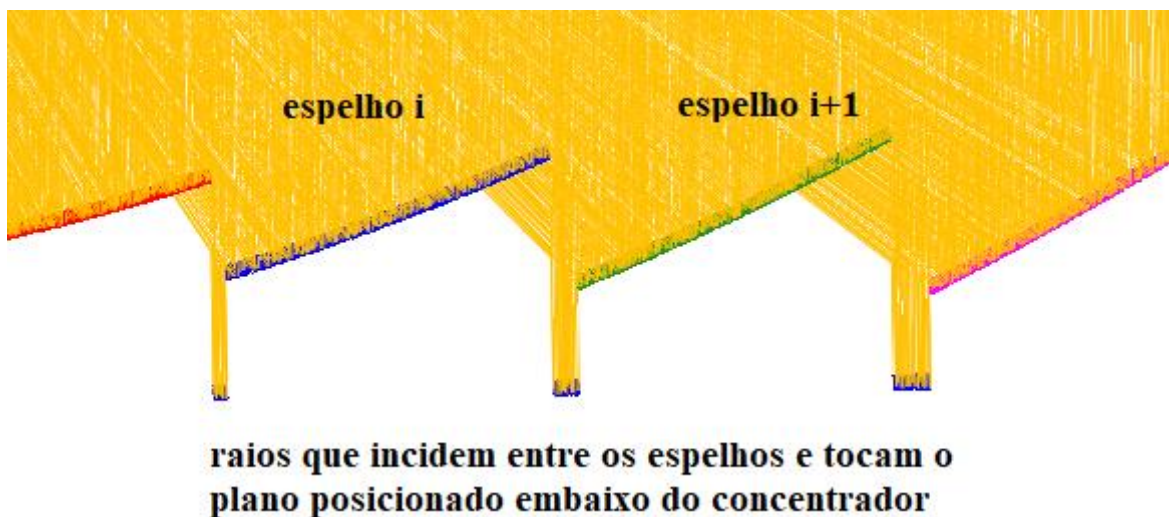
Para quantificar as perdas para o solo via traçado de raios, elaborou-se um script no SolTrace que automatiza a variação das projeções do ângulo de incidência no intervalo de  $0^\circ$  a

85°. Para cada ângulo, o fator de interceptação total é calculado, bem como a quantidade de energia perdida por meio das diversas fontes de perdas ópticas observadas no sistema. Todos os cálculos e simulações são para distribuição probabilística total constante (pillbox), com  $\theta_s = 9$  mrad.

Objetivando a aferição das perdas separadamente, cada uma foi computada de forma diferente. As perdas para o solo foram contabilizadas através de um plano posicionado abaixo do campo de espelhos como mostrado na Figura 22. Para cada ângulo de incidência considerado, a quantidade de raios que atinge o plano dividida pelo total de raios incidentes na abertura do concentrador fornece o percentual de perdas para o solo.

Esse plano tem sua largura ajustada a cada ângulo de incidência, de modo que apenas os raios que atingem as aberturas entre os espelhos o tocam. Isso evita raios que entram na abertura do concentrador e tocam o plano por baixo do espelho mais afastado do eixo do sistema, em ângulos de incidência mais próximos de 85°.

Figura 22 – Raios que incidem entre os espelhos tocam um plano posicionado embaixo do concentrador que serve para quantificar as perdas para o solo.

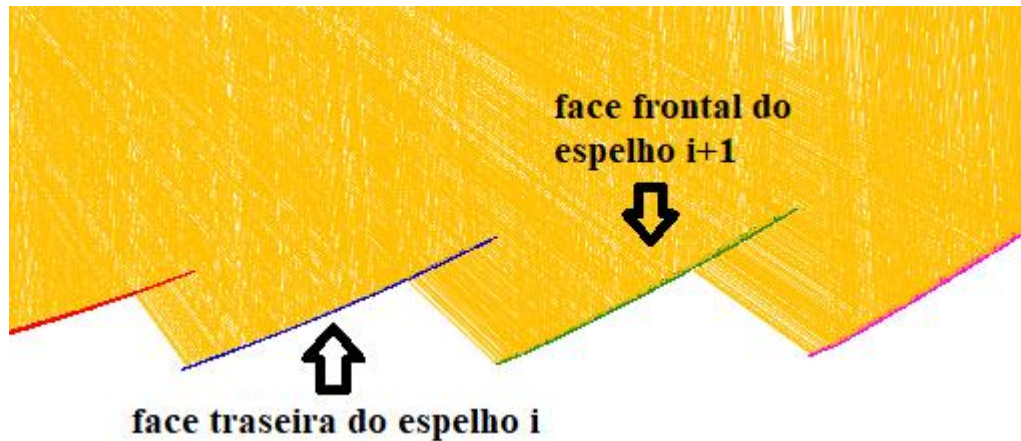


Fonte: recorte retirado e adaptado do SolTrace (2022).

O SolTrace diferencia os raios que tocam faces diferentes de uma mesma superfície, e informa qual o caminho total dos raios, isto é, quais superfícies o raio atinge antes de sair do sistema ou de tocar no absorvedor. Essa funcionalidade foi utilizada para calcular as perdas por bloqueio. Primeiramente, é possível identificar quais raios foram refletidos pela superfície dos espelhos primários. Isto é, quais raios que entram na abertura tocam os espelhos diretamente, nas suas faces frontais. De posse desses raios, e seguindo seu caminho, é

possível identificar quais, após a primeira reflexão, tocam a face traseira do espelho adjacente. A Figura 23 ilustra a reflexão frontal e a incidência traseira para um par de espelhos.

Figura 23 – Faces frontal e traseira de um par de espelhos adjacentes utilizadas para contabilizar as perdas por bloqueio.



Fonte: recorte retirado e adaptado do SolTrace (2022).

Um outro plano foi utilizado para calcular as perdas por sombreamento do concentrador secundário. Ele foi posicionado acima do espelho secundário. A largura desse plano e sua inclinação foram ajustadas para cada ângulo de incidência, de modo que se observou apenas a dimensão real da sombra projetada sobre o primário para os diferentes  $\theta$ .

As perdas por rejeição de raios e dispersão apresentam dificuldades de serem obtidas através do traçado de raios. Elas foram calculadas utilizando o valor do fator de interceptação obtido via traçado de raios para cada valor de  $\theta$ . Conhecendo o valor percentual das outras perdas anteriormente obtidas por meio do traçado de raios, e subtraindo do fator de interceptação encontrado, essas últimas duas fontes de perda foram contabilizadas em conjunto.

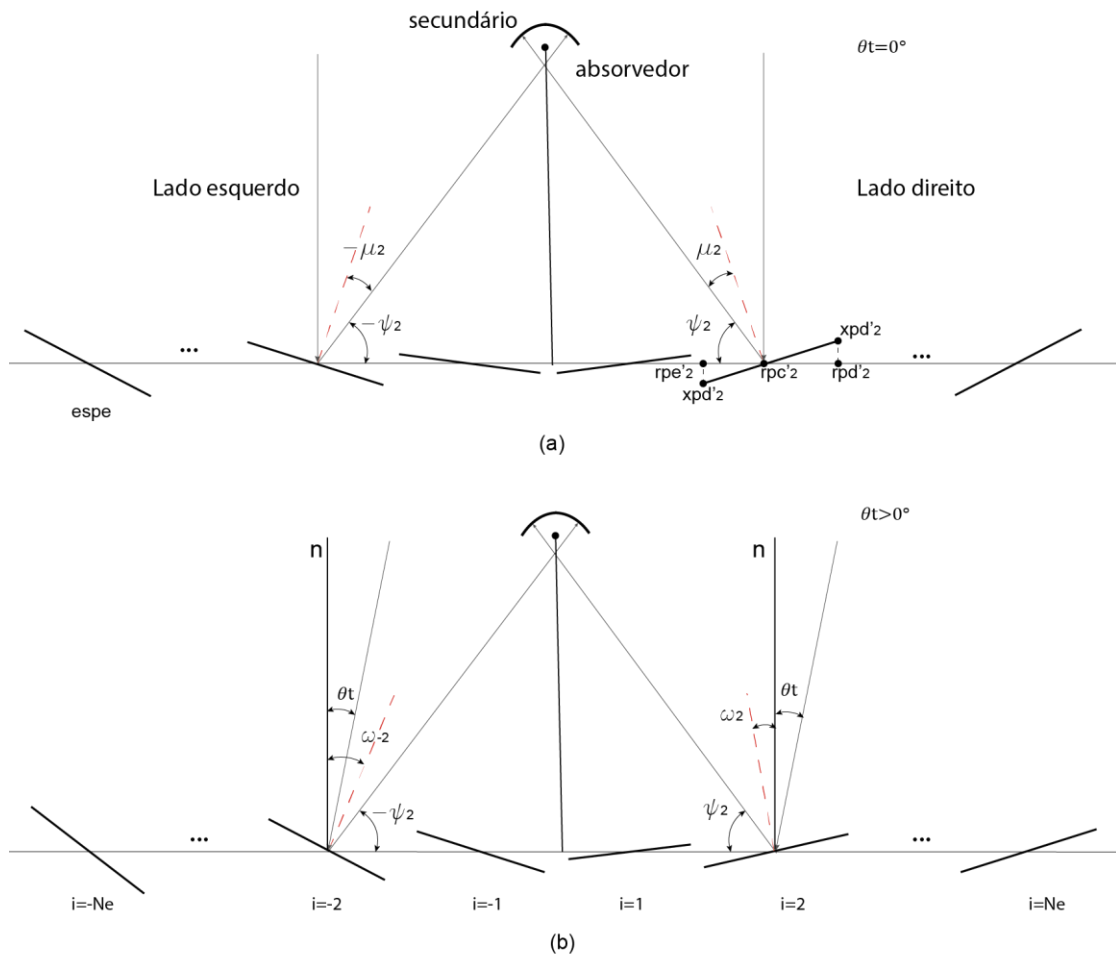
As soluções analíticas são descritas nas próximas seções, levando-se em conta o posicionamento de cada espelho no plano horizontal, as equações que convertem os pontos sobre o aplanático original em pontos sobre os espelhos cilíndricos e a posição de cada borda para cada valor de  $\theta$ .

## 5.2 VARIÁVEIS DE RASTREAMENTO E PONTOS DE INTERESSE

Os cálculos apresentados nas seções seguintes dependem do ponto médio dos espelhos e da inclinação dos espelhos para cada valor de  $\theta_t$ . A variação do ângulo de inclinação dos espelhos,  $\omega$ , que é o ângulo entre a bissetriz e a reta normal ao plano horizontal,  $\mathbf{n}$ , define o rastreamento dos espelhos como mostrado na Figura 24.

Os espelhos têm raio de curvatura relativamente grandes e para simplificar as ilustrações as larguras de suas aberturas são desenhadas, com numeração indicada pelo índice  $i$ , seguindo a convenção: espelhos posicionados à direita do absorvedor tem índice positivo, enquanto os do lado esquerdo tem índice negativo, como mostrado na Figura 24b.

Figura 24 – Ângulos e pontos de interesse para descrição geométrica das perdas: (a) incidência normal, e (b) incidência para  $\theta_t > 0^\circ$ .



Fonte: O autor (2022).

Cada espelho tem uma inclinação inicial definida. Isto é, para  $\theta_t = 0$ ,  $\omega_i = \mu_i$ , como mostrado na Figura 24a. Em  $\theta_t = 0$ ,  $\mu_i$  é também o ângulo de reflexão.

Os ângulos de interesse são obtidos a partir da generalização:

$$\begin{cases} \mu_i = \frac{-\psi_{(i)}}{2} + \frac{\pi}{4}, & \text{para } i > 0 \\ \mu_i = \frac{\psi_{(-i)}}{2} - \frac{\pi}{4}, & \text{para } i < 0 \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} \omega_i = \mu_{(i)} - \frac{\theta_t}{2}, & \text{para } i > 0 \\ \omega_i = -\mu_{(-i)} - \frac{\theta_t}{2}, & \text{para } i < 0 \end{cases} \quad (33)$$

O ângulo  $\psi_i$  define o raio refletido com relação ao plano horizontal e é invariante em relação a  $\theta_t$  (torre solar 2D). O ângulo  $\mu_i$  é definido para incidência normal e também permanece invariante com relação ao  $\theta_t$ . O ângulo  $\omega_i$  expressa a variação da normal ao espelho primário com a relação ao eixo vertical, quando o ângulo de incidência varia.

As abscissas das bordas esquerdas e direitas dos espelhos ( $\text{rpd}'_i, \text{rpe}'_i$ ), bem como as ordenadas ( $\text{xpd}'_i, \text{xpe}'_i$ ) em função da variação do  $\theta_t$ , considerando que todos os espelhos têm larguras constantes,  $L_{es}$ , podem ser obtidas das equações:

$$\begin{cases} \text{rpd}'_i = \text{rpc}'_i + \frac{L_{es}}{2} \cos(\omega_i) \\ \text{rpe}'_i = \text{rpc}'_i - \frac{L_{es}}{2} \cos(\omega_i) \end{cases} \quad (34)$$

$$\begin{cases} \text{xpd}'_i = \frac{L_{es}}{2} \sin(\omega_i) \\ \text{xpe}'_i = \frac{L_{es}}{2} \sin(-\omega_i) \end{cases} \quad (35)$$

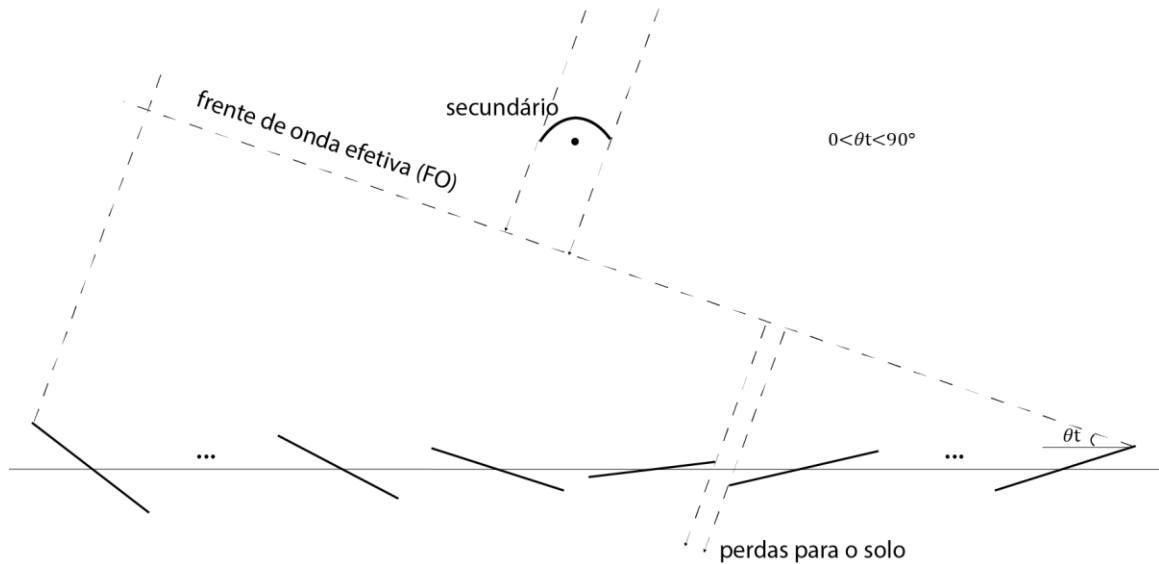
### 5.3 PERDAS TRANSVERSAIS DE NATUREZA INCIDENTE

As perdas para o solo e por sombreamento do concentrador secundário são classificadas como de natureza incidente, pois são contabilizadas por meio dos raios que incidem na abertura do concentrador. Elas são quantificadas a partir da projeção da área de perdas sobre a frente de onda efetiva, FO, mostrada na Figura 25. A frente de onda efetiva é a abertura efetiva do concentrador vista pelos raios incidentes e varia sua largura em função da posição da borda direita do último espelho à direita,  $\text{rpd}'_{Ne}$ , da posição da borda esquerda do

último espelho à esquerda do concentrador,  $rpe'_{-Ne}$ , e do  $\cos(\theta_t)$  segundo a equação (Oliveira et al., 2015):

$$FO = (rpd'_{Ne} - rpe'_{(-Ne)}) \cos(\theta_t) \quad (36)$$

Figura 25 – Frente de onda efetiva para variação transversal do ângulo de incidência.



Fonte: O autor (2022).

### 5.3.1 Perdas para o solo

O método apresentado no Cap. 4 para posicionamento dos espelhos é simplificado e relaciona a redução das perdas para o solo à variação do parâmetro  $s$ , que possibilita primários com menor profundidade, mais próximos de um plano, pois não se utiliza de nenhum artifício matemático para a redução destas perdas. O valor de  $s = -2,25$  foi satisfatório pois apresenta percentual de perda para o solo abaixo de 8% com espelhos nivelados no plano horizontal.

Observa-se que as perdas para o solo podem ser reduzidas a zero incrementando a largura dos espelhos. Todavia, larguras diferentes inserem dificuldades construtivas ao sistema, além de aumentar as perdas por bloqueio. Uma descrição matemática para posicionar espelhos primários de igual largura (por simplicidade e custo) garantindo baixas perdas para o solo independentemente do valor de  $s$  foi elaborada como segue.

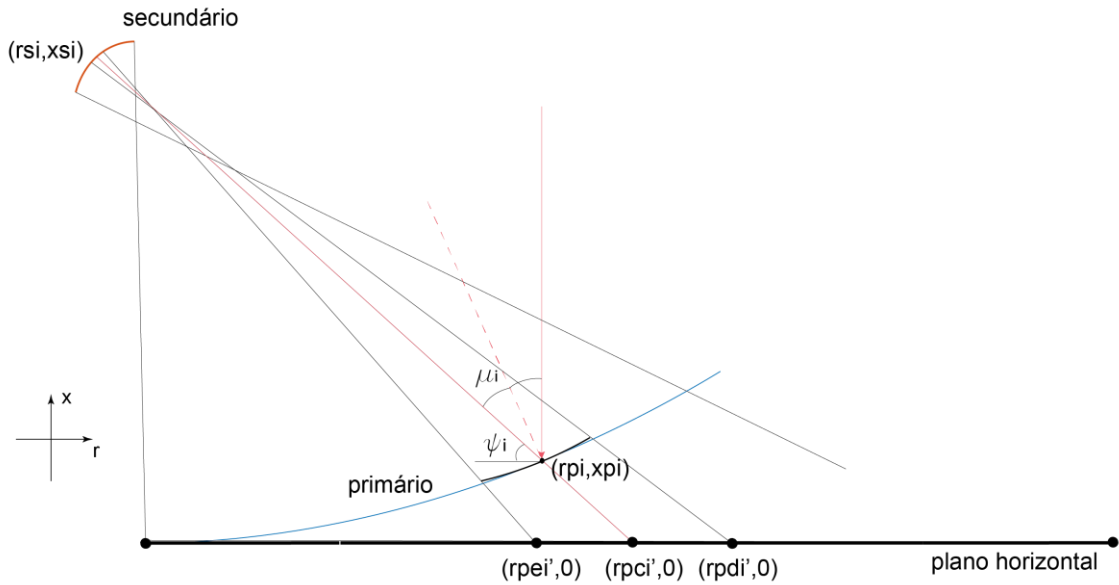
Da Figura 26, tem-se:

$$\tan \psi = \frac{xs}{rp' - rs} = \frac{xp}{rp' - rp} \quad (37)$$

E a equação que transforma todos os pontos sobre a curvatura primária em pontos sobre o plano horizontal é:

$$r_p' = \frac{xs \, rp - xp \, rs}{xs - xp} \quad (38)$$

Figura 26 – Transformação de pontos sobre o primário em pontos sobre o plano horizontal.



Fonte: O autor (2022).

Com isso, todos os pontos no solo são função de pontos sobre a geometria aplanática:  $rp' = f(rp, xp, rs, xs) = f(\varphi)$ . Isto é, para cada  $\varphi$ , há um ponto equivalente no solo, sendo possível determinar a abertura máxima do concentrador com espelhos no plano horizontal:

$$rp'_{\max} = \frac{xs(\varphi_{\max}) \, rp(\varphi_{\max}) - xp(\varphi_{\max}) \, rs(\varphi_{\max})}{xs(\varphi_{\max}) - xp(\varphi_{\max})} \quad (39)$$

na qual  $rp'_{\max}$  é a coordenada abcissa máxima no solo.

Esse valor é dividido pelo número de espelhos que se quer inserir no primário,  $N_e$ , para obter a largura constante dos espelhos no solo,  $L_{es}$ , e as coordenadas abcissas do ponto médio de cada espelho será:

$$rpc'_i = (i - 1)L_{es} + \frac{L_{es}}{2} \quad (40)$$

Desta forma, utilizando a Equação 38, cada ponto central vai ter um valor correspondente de  $\varphi$ ,  $rp$ ,  $xp$ ,  $rs$ ,  $xs$ . Estes pontos servem para calcular a inclinação correta dos espelhos com método descrito no Cap. 4.

Os pontos das extremidades dos espelhos na inclinação zero ( $\omega_i = 0$ ) são utilizados para calcular a largura das imagens formadas por cada espelho no secundário,  $h$ , e as curvaturas cilíndricas,  $R$ , conforme método descrito no Cap. 4, e são obtidos fazendo:

$$rpe'_i = (i - 1)L_{es} \quad (41)$$

$$rpd'_i = iL_{es} \quad (42)$$

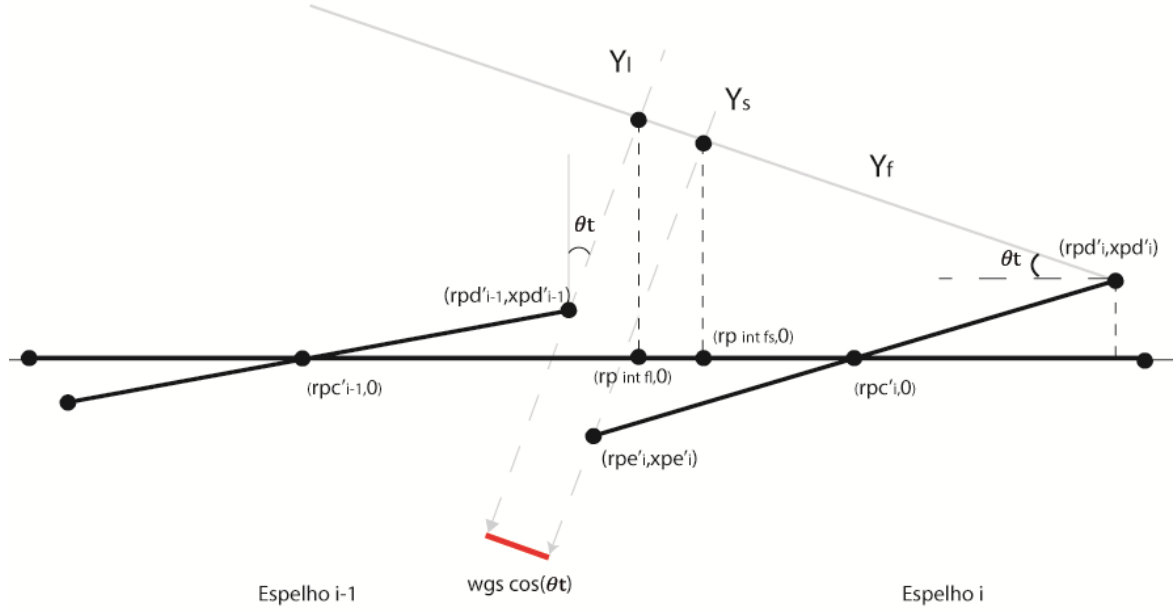
As perdas totais para o solo zerariam se houvesse um instante de tempo para o qual todos os espelhos tivessem suas normais perpendiculares ao plano horizontal. O que não acontece na prática: na incidência normal ( $\theta_t = 0$ ), cada espelho tem inclinação  $\mu_i$ . Esta inclinação faz com que haja espaços entre os espelhos e consequentemente perdas para o solo até certo ângulo  $\theta_t$ .

Para simplificação computacional, considera-se para os cálculos de perdas para o solo a abertura plana do espelho cilíndrico. Observa-se que a deformação da borda cilíndrica em relação a abertura plana tem valor na ordem de  $10^{-4}$ , obtido da expressão  $R - \sqrt{R^2 - (\frac{L_{es}}{2})^2}$ , e não influencia no resultado.

A Figura 27 ilustra como as perdas para o solo acontecem para incidência não normal para o lado direito do eixo óptico ( $i > 0$ ). As perdas para o solo podem ser quantificadas usando a frente de onda efetiva descrita na Seção 5.3. Considerando a contagem de  $i$  iniciando em  $i = 2$  pois não há perdas para o solo entre a borda esquerda do espelho  $i = 1$  e a origem, e utilizando a reta de frente de onda,  $Y_f$ , a reta que passa pela borda direita do espelho  $i$ ,  $Y_l$ , e a reta que passa pela borda esquerda do espelho  $i-1$ ,  $Y_s$ :

$$\begin{cases} Y_f = xpd'_{Ne} + (rpd'_{Ne} - rp'_{int})\tan \theta_t \\ Y_l = xpd'_{i-1} + (rp'_{int fl} - rpd'_{i-1})\tan(\frac{\pi}{2} - \theta_t) \\ Y_s = xpe'_i + (rp'_{int fs} - rpe'_i)\tan(\frac{\pi}{2} - \theta_t) \end{cases} \quad (43)$$

Figura 27 – Perdas para o solo no lado direito do concentrador.



Fonte: O autor (2022).

Igualhando as duas retas à reta de frente de onda, as coordenadas abscissas de interseção que delimitam a largura da perda entre espelhos são obtidas:

$$\begin{cases} r_{\text{pint fs}} = \frac{xpe'_i - xpd'_{Ne} - rpe'_i \tan(90 - \theta_t) - rpd'_{Ne} \tan \theta_t}{-\tan(\frac{\pi}{2} - \theta_t) - \tan(\theta_t)} \\ r_{\text{pint fl}} = \frac{xpd'_{i-1} - xpd'_{Ne} - rpd'_{i-1} \tan(90 - \theta_t) - rpd'_{Ne} \tan \theta_t}{-\tan(\frac{\pi}{2} - \theta_t) - \tan(\theta_t)} \end{cases} \quad (44)$$

Para o lado esquerdo do concentrador ( $i < 0$ ), as equações mudam devido ao posicionamento simétrico pelo eixo dos espelhos primários, e a contagem de  $i$  inicia em  $i = -2$  pois não há perdas para o solo entre a borda direita do espelho  $i = -1$  e a origem:

$$\begin{cases} Y_f = xpd'_{Ne} + (rpd'_{Ne} - r_{\text{pint f}}) \tan \theta_t \\ Y_l = xpe'_{i+1} + (r_{\text{pint fl}} - rpe'_{i+1}) \tan(\frac{\pi}{2} - \theta_t) \\ Y_s = xpd'_i + (r_{\text{pint fs}} - rpd'_i) \tan(\frac{\pi}{2} - \theta_t) \end{cases} \quad (45)$$

E os pontos de interseção:

$$\begin{cases} r_{\text{pint fs}} = \frac{x_{\text{pd}'i} - x_{\text{pd}'\text{Ne}} - r_{\text{pd}'i} \tan(\frac{\pi}{2} - \theta_t) - r_{\text{pd}'\text{Ne}} \tan \theta_t}{-\tan(\frac{\pi}{2} - \theta_t) - \tan(\theta_t)} \\ r_{\text{pint fl}} = \frac{x_{\text{pe}'i+1} - x_{\text{pd}'\text{Ne}} - r_{\text{pe}'i+1} \tan(\frac{\pi}{2} - \theta_t) - r_{\text{pd}'\text{Ne}} \tan \theta_t}{-\tan(\frac{\pi}{2} - \theta_t) - \tan(\theta_t)} \end{cases} \quad (46)$$

A projeção dos espaços entre espelhos sobre a frente de onda para o lado direito ( $i > 0$ ) é:

$$\text{wgs}_{i,i-1} = \sqrt{(r_{\text{pint fs}} - r_{\text{pint fl}})^2 + [Y_l(r_{\text{pint fl}}) - Y_s(r_{\text{pint fs}})]^2} \quad (47)$$

A projeção dos espaços entre espelhos sobre a frente de onda para o lado esquerdo ( $i < 0$ ) é:

$$\text{wgs}_{i,i+1} = \sqrt{(r_{\text{pint fs}} - r_{\text{pint fl}})^2 + [Y_l(r_{\text{pint fl}}) - Y_s(r_{\text{pint fs}})]^2} \quad (48)$$

As perdas para o solo totais:

$$G(\theta_t) = 100 \frac{\sum_{i=2}^{\text{Ne}} \text{wgs}_{i,i-1} + \sum_{i=-2}^{-\text{Ne}} \text{wgs}_{i,i+1}}{\text{FO}} \quad (49)$$

### 5.3.2 Sombreamento entre espelhos adjacentes

A partir de certo ângulo, as perdas para solo zeram para determinado par de espelhos. Elas não zeram ao mesmo tempo entre todos os espelhos. Um instante de tempo após a perda entre dois espelhos zerar, começa a surgir o sombreamento entre eles, efeito que pode ser tratado com equações semelhantes.

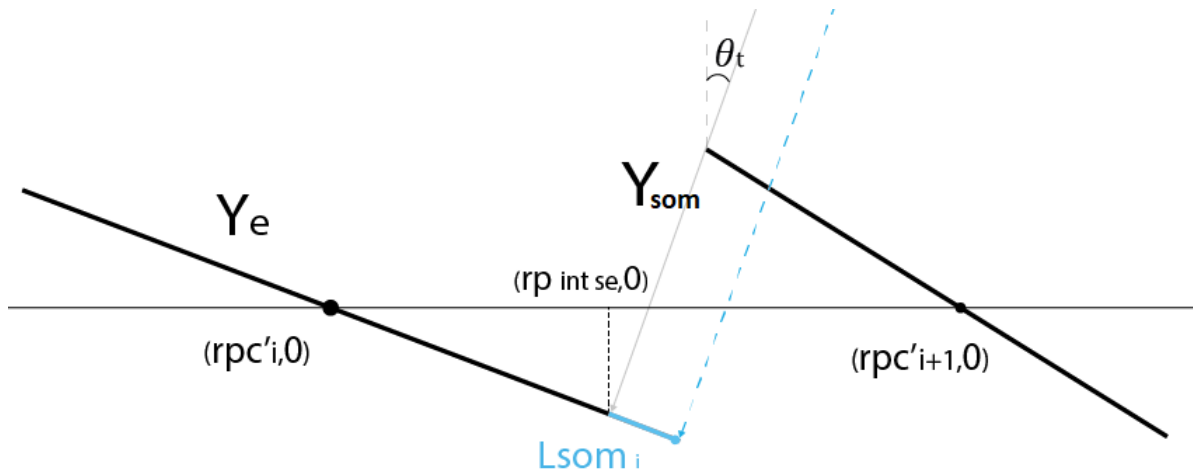
A quantidade de sombra que cada espelho projeta sobre seu vizinho pode ser obtida através de método semelhante ao usado para descrever as perdas entre espelhos, utilizando duas retas auxiliares,  $Y_{\text{som}}$  e  $Y_e$ , como mostrado na Figura 28.

$Y_{\text{som}}$  é a reta de sombra, relacionado ao raio incidente no espelho  $i$  que toca a borda esquerda do espelho  $i+1$ , tendo equação deduzida a partir da projeção transversal do ângulo de incidência e da posição da borda esquerda do espelho  $i+1$ .  $Y_e$  corresponde à reta do espelho sombreado, e sua inclinação é igual à do espelho  $i$ . As equações das retas estão mostradas no sistema de Equações 50.

A coordenada abcissa de intersecção entre as duas retas,  $r_{\text{int se}}$ , pode ser obtida fazendo  $Y_{\text{som}} = Y_e$ , e a ordenada da resolução do sistema:

$$\begin{cases} Y_e = xpd'_i + (rpd'_i - r_{p \text{ int se}})\tan \omega_i \\ Y_{\text{som}} = xpe'_{i+1} - (rpe'_{i+1} - r_{p \text{ int se}})\tan(\frac{\pi}{2} - \theta_t) \end{cases} \quad (50)$$

Figura 28 – Sombreamento entre espelhos adjacentes.



Fonte: O autor (2022).

Portanto, a largura sombreada por espelho será:

$$L_{\text{som } i} = \sqrt{(rpd'_i - r_{p \text{ int se}})^2 + (Y_e(r_{p \text{ int se}}) - xpd'_i)^2} \quad (51)$$

Neste trabalho, considerou-se que a área de sombra do concentrador é complementar a área de perda para o solo, e representa uma parcela de material inutilizável do sistema. Porém, a existência das sombras não impõe perdas à energia incidente, pois a largura sombreada de um determinado espelho está iluminada no espelho causador da sombra (OLIVEIRA et al., 2015). Adicionalmente, pode-se verificar que a frente de onda incidente é plenamente recebida pelas superfícies refletivas. As sombras expressam a redução da largura da frente de onda com o ângulo transversal. Isto é, basta uma superfície menor de espelhos para refletir a radiação incidente.

O sombreamento entre espelhos adjacentes impõe ao sistema variações nas larguras úteis de cada espelho, isto é, nas coordenadas efetivas das bordas, sendo importantes para a

descrição das perdas por bloqueio, dispersão e rejeição de raios, discutidas nas seções seguintes.

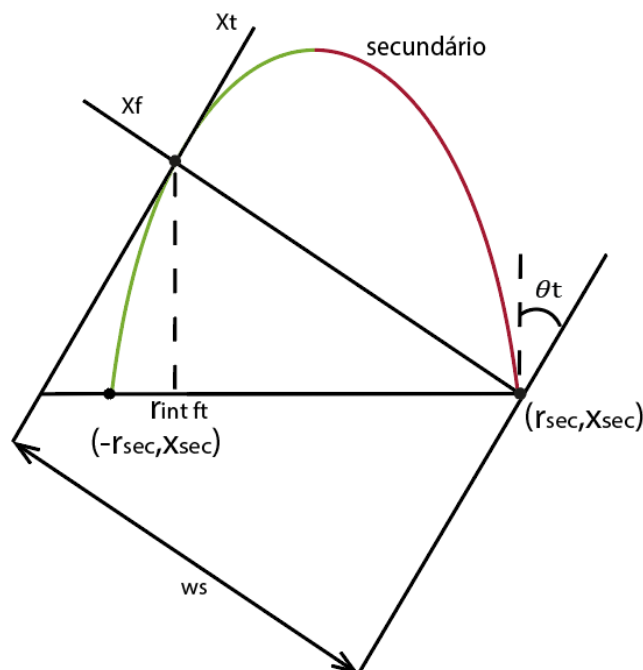
### 5.3.3 Perdas por sombreamento do concentrador secundário

A partir dos testes feitos no Cap. 4, verificou-se que a sombra do secundário sobre o primário é uma importante fonte de perdas de raios incidentes. Um efeito óbvio da diminuição da abertura secundária, sem que se altere o valor de  $|s|$ , é a diminuição do fator de interceptação na incidência não normal, mais especificamente do  $\gamma_2$  para  $|s|$  menores. Para  $|s|$  maiores o secundário é de extrema importância, já que a parcela  $\gamma_2$  representa a fração maior do  $\gamma$ .

Contudo, um secundário muito largo acaba reduzindo o  $\gamma$  na incidência normal pois a sombra projetada é maior. É preciso calcular  $\gamma$  para outros ângulos de incidência para avaliar qual parâmetro  $K$ , que define a abertura do secundário, é mais vantajoso.

A largura da sombra do secundário pode ser determinada utilizando duas retas: uma na direção do raio incidente,  $x_t$ , e a outra na direção da frente de onda,  $x_f$ , mostradas na Figura 29.

Figura 29 – Largura da sombra do concentrador secundário projetada sobre a frente de onda efetiva.



Fonte: O autor (2022).

$x_t$  é a reta tangente à curvatura secundária na coordenada  $r_{int\ ft}$  (que maximiza o valor de  $w_s$ ), e  $x_f$  é a reta paralela à frente de onda, com inclinação  $\theta_t$ , definida pela equação:

$$x_f = -\tan(\theta_t) r_f + [x_{sec} + r_{sec} \tan(\theta_t)] \quad (52)$$

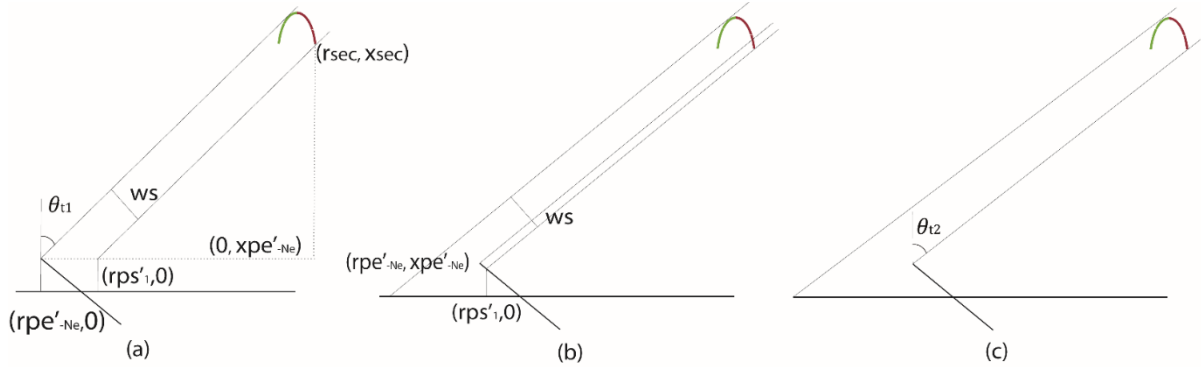
Desta forma, tem-se:

$$w_s = (r_{sec} - r_{int\ ft}) / \cos(\theta_t) \quad (53)$$

e  $w_s$  varia com o valor de  $\theta_t$ , sendo máxima na incidência normal ( $\theta_t = 0$ ).

Há sempre um valor de  $\theta_t$  para o qual a sombra do secundário começa a sair do limite da abertura do primário ( $\theta_{t1}$ ). E há um valor de  $\theta_t$  para o qual não há mais sombra projetada sobre o primário,  $\theta_{t2}$ , como mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Sombra secundária (a) totalmente sobre o primário, (b) parcialmente sobre o primário e (c) totalmente fora do primário.



Fonte: O autor (2022).

$rps'_1$  representa uma coordenada auxiliar para calcular o instante de tempo para o qual a sombra do secundário começa a deixar o primário  $\theta_t = \theta_{t1}$  (ver Figura 30a):

$$rps'_1 = r_{sec} - (x_{sec} - xpe'_{-Ne}) \tan(\theta_t) \quad (54)$$

$rps'_1$  tem valor inicial igual a  $r_{sec}$ , passa pela origem do sistema, e serve no momento de determinar o instante de tempo para o qual a sombra começa a sair do primário, isto é, o valor de  $\theta_t$  para o qual:

$$rpe'_{-Ne} = rps'_1 - \frac{w_s}{\cos \theta_t} \quad (55)$$

A partir deste instante a largura da sombra do secundário começa a diminuir (ver Figura 30b) até atingir zero quando  $rps'_1 = rpe'_{-Ne}$  em  $\theta_t = \theta_{t2}$ , regida pela equação:

$$w_s = (rps'_1 - rpe'_{-Ne}) \cos \theta_t \quad (56)$$

O instante de tempo para o qual não há mais projeção de sombra (Figura 30c), pode ser obtido fazendo:

$$\tan \theta_{t2} = \frac{r_{sec} - rpe'_{-Ne}}{x_{sec} - xpe'_{-Ne}} \quad (57)$$

e a perda percentual por sombreamento do secundário é:

$$S(\theta_t) = 100 \frac{w_s}{FO} \quad (58)$$

#### 5.4 PERDAS TRANSVERSAIS DE NATUREZA REFLETIVA

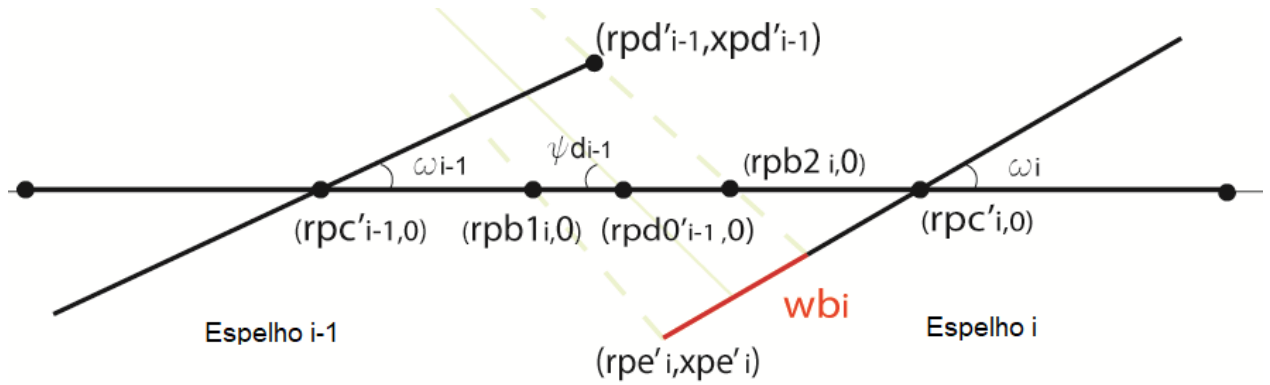
As perdas por bloqueio, dispersão e rejeição de raios são classificadas como de natureza refletiva, pois são contabilizadas através dos raios refletidos pelos espelhos primários.

##### 5.4.1 Perdas por bloqueio

Um dos problemas fundamentais dos concentradores Fresnel, que surge devido ao posicionamento dos pontos médios dos espelhos sobre o plano horizontal, é o bloqueio, que é a interceptação da radiação solar refletida por um dado espelho pela parte traseira do espelho adjacente.

Assim como nas perdas para o solo, o equacionamento das perdas por bloqueio deve ser feito considerando metade da abertura do concentrador. Para espelhos à direita do eixo óptico do concentrador ( $i < 0$ ), as perdas por bloqueio podem ser quantificadas com base na Figura 31, que considera a abertura do espelho cilíndrico.

Figura 31 – Bloqueio entre espelhos no lado direito.



Fonte: O autor (2022).

na qual,  $rpb1_i$  e  $rpb2_i$  são os pontos sobre o eixo das abscissas relacionadas aos limites da região bloqueada do espelho  $i$ .

$rpb1_i$  está relacionado geometricamente à posição da borda esquerda do espelho  $i$ : é o ponto onde o raio refletido pela borda esquerda do espelho  $i$  toca o eixo das abscissas antes de ser bloqueado, e pode ser obtida da igualdade:

$$\tan(\omega_{i-1}) = \frac{(rpd0'_{i-1} - rpb1_i) \tan(\psi_{di-1})}{rpb1_i - rpc'_{i-1}} \quad (59)$$

na qual  $rpd0'_{i-1}$  é a coordenada abscissa da borda direita do espelho  $i-1$  para  $\omega_{i-1} = 0$  e  $\psi_{di-1}$  é o ângulo entre o raio refletido no ponto  $(rpd0'_{i-1}, 0)$  e o plano horizontal, obtido através das Equações 37 e 38.

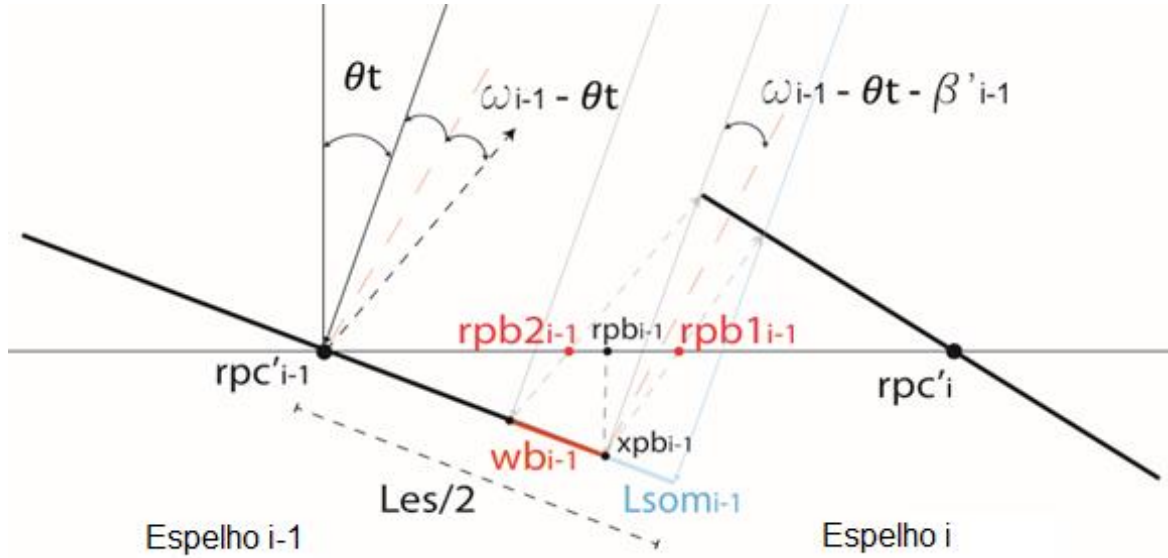
Enquanto  $rpb2_i$  está relacionada geometricamente com a posição da borda direita do espelho  $i-1$ : é o ponto onde o raio refletido bloqueado pela borda direita do espelho  $i-1$  toca o eixo das abscissas, e pode ser obtida da igualdade:

$$\tan(\omega_i) = \frac{(rpb2_i - rpd0'_{i-1}) \tan(\psi_{di-1})}{rpc'_i - rpb2_i} \quad (60)$$

Os raios refletidos não são paralelos devido à curvatura cilíndrica dos espelhos. Entretanto, o espaçamento entre região bloqueada e espelho bloqueador é tão pequeno que retas na direção dos raios refletidos se aproximam do paralelismo e as aproximações são válidas para descrever este fenômeno para o lado direito do concentrador, como mostrado na seção de resultados.

Para o lado esquerdo do concentrador ( $i < 0$ ), é preciso fazer um ajuste às equações. Isso porque o concentrador é simétrico pelo eixo: as inclinações dos espelhos são invertidas ( $\mu_i = -\mu_{-i}$ ), assim como as bordas bloqueadas e bloqueadoras, como pode ser visto na Figura 32.

Figura 32 – Bloqueio entre espelhos para o lado esquerdo.



Fonte: O autor (2022).

$rpb2_{i-1}$  pode ser obtido à semelhança do que fora feito para o lado direito, pois é um ponto que depende da posição da borda esquerda do espelho  $i$ . Desta forma:

$$\tan(\omega_{i-1}) = \frac{(rpe0'_i - rpb2_{i-1}) \tan(\psi_{ei})}{rpb2_{i-1} - rpc'_{i-1}} \quad (61)$$

Na qual  $rpe0'_i$  é a coordenada abscissa da borda esquerda do espelho  $i$  para  $\omega_i = 0$  e  $\psi_{ei}$  é o ângulo entre o raio refletido no ponto  $(rpe0'_i, 0)$  e o plano horizontal, obtido através das Equações 37 e 38. O oposto deste ângulo pelo vértice é usado na Equação 61, e por isso se relaciona com  $\omega_{i-1}$ .

Para calcular  $rpb1_{i-1}$  do lado esquerdo, considera-se o efeito óptico da curvatura cilíndrica do espelho. Como descrito no Cap. 4, nos espelhos com curvatura cilíndrica,  $R$ , o raio refletido pela borda direita para o lado esquerdo do concentrador tem ângulo de reflexão  $2\mu_i - 2\beta_i$ , na qual  $\sin \beta_i = \frac{L_{es}/2}{R_i}$ . Considerando que há uma região do espelho  $i-1$  sombreada pelo espelho  $i$ , a largura iluminada do espelho  $i-1$  é  $(L_{es}/2) - L_{som\ i-1}$  (ver Figura 32).

Desta forma, conhecendo a curvatura cilíndrica do espelho  $i-1$ ,  $R_{i-1}$ , o ângulo  $\beta'_{i-1}$  para cálculo do ângulo de reflexão do primeiro raio bloqueado mostrado na Figura 32, que toca o eixo das abscissas no ponto  $rpb1_{i-1}$ , pode ser obtido fazendo:

$$\sin \beta'_{i-1} = \frac{(L_{es}/2) - L_{som\ i-1}}{R_{i-1}} \quad (62)$$

Conhecendo  $\beta'_{i-1}$ , pode-se determinar o ângulo de reflexão do primeiro raio bloqueado com as coordenadas auxiliares:

$$\begin{cases} rpb_{i-1} = rpc'_{i-1} + (L_{es}/2 - L_{som\ i-1}) \cos \omega_{i-1} \\ xpb_{i-1} = (L_{es}/2 - L_{som\ i-1}) \sin \omega_{i-1} \end{cases} \quad (63)$$

E calcular  $rpb1_{i-1}$  fazendo:

$$\tan(2\mu_{i-1} - 2\beta'_{i-1} - \theta_t) = \frac{rpb1_{i-1} - rpb_{i-1}}{xpb_{i-1}} \quad (64)$$

Há um ângulo  $\theta_t$  para o qual o bloqueio no lado esquerdo zera. Isto acontece quando  $rpb2_i$  é maior ou igual a  $rpb1_i$ . É possível, através da equação de transformação, tanto para o lado direito quanto para o esquerdo do concentrador, achar o valor de  $\varphi$  correspondentes a estes pontos,  $\varphi_{rpb1}$  e  $\varphi_{rpb2}$ . Este é o intervalo angular bloqueado e o percentual de perda por espelho pode ser calculado fazendo:

$$wb_i = \frac{\varphi_{rpb2\ i} - \varphi_{rpb1\ i}}{2\varphi_{max}} \quad (65)$$

Desta forma, o bloqueio total será:

$$B(\theta_t) = 100 \frac{\sum_{i=2}^{Ne} wb_i + \sum_{i=-2}^{-Ne} wb_i}{2\varphi_{max}} \quad (66)$$

na qual, para os espelhos mais próximos do absorvedor ( $i = 1$  e  $i = -1$ ) não há bloqueio, isto é,  $wb_1 = wb_{-1} = 0$ .

### 5.4.2 Rejeição de raios

Cada ponto sobre o primário aplanático tem um correspondente sobre o espelho cilíndrico. Os pontos aplanáticos refletem raios com incidência normal que chegam ao foco. Os pontos cilíndricos, não. Alguns raios refletidos pelos espelhos cilíndricos se aproximam do foco, mas não chegam nele. Parte é absorvida pois o absorvedor possui raio que tolera desvios ópticos. Desta forma, para calcular as perdas por rejeição de raios, é preciso identificar o ponto onde cada raio refletido pelos espelhos cilíndricos toca o secundário.

Utilizando a equação de transformação apresentada na Seção 5.3.1, pela qual todos os pontos sobre o primário aplanático podem ser transportados para um plano horizontal, nivelados à altura  $x_{p0}$ , todas as coordenadas abcissas no plano horizontal puderam ser calculadas. As coordenadas abcissas dos espelhos cilíndricos para  $\omega = 0$  devem coincidir com as obtidas da Equação 38, e, para facilitar as deduções apresentadas, serão referidas a partir de agora como  $rp_{cil}(0)$ . Valendo-se desses valores, é possível calcular todas as ordenadas sobre o espelho cilíndrico considerando, inicialmente, que ele não tem inclinação (isto é,  $\omega = 0$ ), ou seja, está paralelo ao plano horizontal, fazendo:

$$xp_{cil}(0) = R_i - \sqrt{R_i^2 - (rp_{cil}(0) - rpc'_i)^2} \quad (67)$$

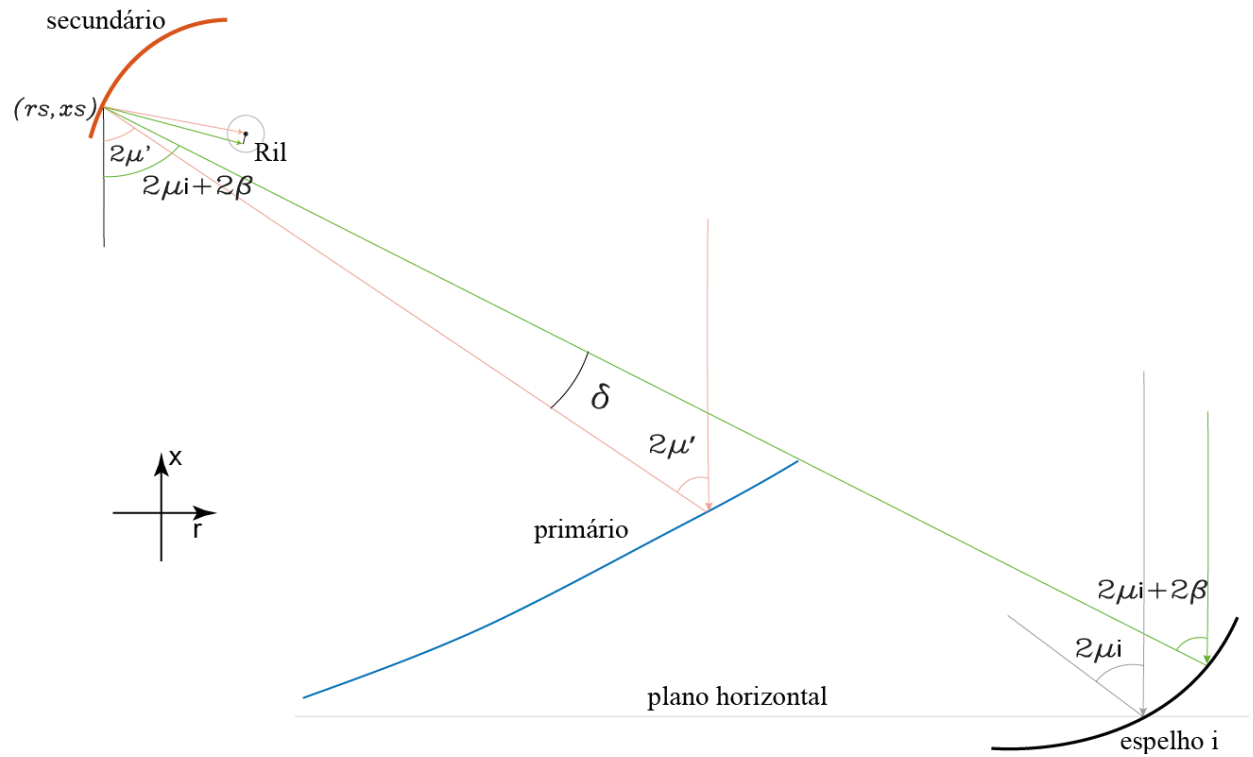
na qual  $R_i$  é o raio de curvatura cilíndrico do espelho  $i$  obtido através de método descrito no Cap. 4, e  $rpc'_i$  seu ponto médio.

Com todos os valores ( $rp_{cil}(0)$ ,  $xp_{cil}(0)$ ) determinados, é possível obter o deslocamento dos pontos que descrevem os espelhos primários para qualquer valor de  $\theta_t$  (ou  $\omega$ ). Ou seja, é possível desenhar completamente os espelhos primários com suas inclinações para qualquer valor de  $\theta_t$  fazendo:

$$\begin{cases} rp_{cil}(\omega) = rpc'_i + (rp_{cil}(0) - rpc'_i) \cos \omega \\ xp_{cil}(\omega) = xp_{cil}(0) + (rp_{cil}(0) - rpc'_i) \sin \omega \end{cases} \quad (68)$$

Os raios refletidos pelos espelhos cilíndricos chegam com um desvio angular no secundário,  $\delta$ , possibilitando o cálculo de um raio iluminado,  $R_{il}$ , associado a cada ponto, como mostrado na Figura 33.

Figura 33 – Reflexão do espelho primário que chega com o desvio angular no secundário em relação ao raio de referência que parte do primário original.



Fonte: O autor (2022).

Para quantificar as perdas por rejeição é preciso associar cada ponto sobre o espelho cilíndrico a um ponto de referência que, teoricamente, na incidência normal, reflete um raio para o foco do sistema. Obtidos a partir das equações que descrevem o aplanático, cada ponto sobre a geometria original fornece um ângulo de referência,  $\mu'$ , determinado a partir do conjunto de valores  $(\varphi, r_p, x_p, r_s, x_s)$ .

Com isso, tem-se:

$$\delta = 2\mu' - (2\mu_i + 2\beta) \quad (69)$$

E o raio iluminado por cada ponto pode ser obtido da equação:

$$R_{il} = \sqrt{x_s^2 + r_s^2} \sin \delta \quad (70)$$

Quanto maior for o raio absorvedor, maior a tolerância para desvios ópticos e para valores de  $\delta$ . A depender do ponto e do espelho analisado, o valor de  $\delta$  pode ser positivo ou negativo. Para cada ponto:

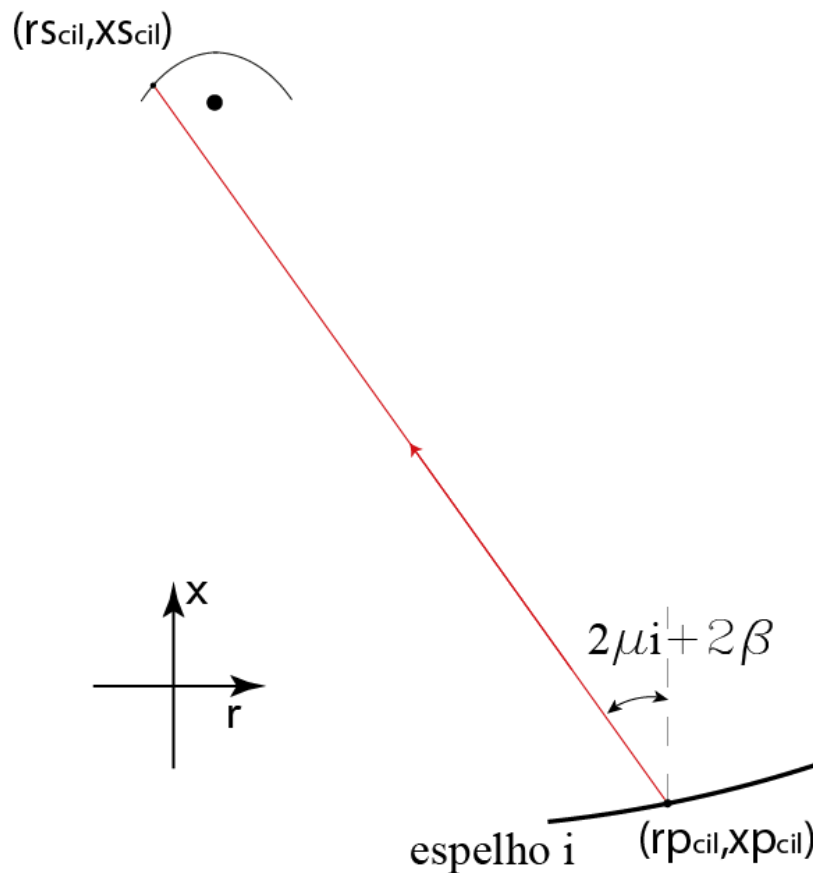
1. Se  $R_{il} < R_{abs}$ , não há rejeição de raio,

2. Se  $R_{il} > R_{abs}$ , há contribuição para a rejeição de raios total.

Para a incidência não normal ( $\theta_t > 0$ ), desenvolveu-se o método numérico que identifica os pontos nos quais os raios refletidos pelos espelhos cilíndricos atingem o secundário. Estes pontos variam com  $\theta_t$ .

Os espelhos seguem o movimento do Sol de forma que os ângulos que os raios refletidos pelos espelhos primários fazem com a normal não variam com a variação de  $\theta_t$ , como exemplificado através do raio refletido mostrado na Figura 34. Sendo assim, é possível deduzir equações para cálculo dos pontos secundários correspondentes utilizando as coordenadas dos pontos sobre o espelho cilíndrico.

Figura 34 – Ângulo que o raio refletido pelo espelho cilíndrico primário faz com a normal não varia com a variação de  $\theta_t$ .



Fonte: O autor (2022).

Cada ponto tem um par de coordenadas  $(r_{pcil}, x_{pcil})$ , e um  $\beta$  associado, que pode assumir valores de  $-\beta$  a  $+\beta$  a depender da posição sobre o espelho, sendo obtido através da expressão:

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{rp_{cil}-rpc'_i}{R_i}\right) \quad (71)$$

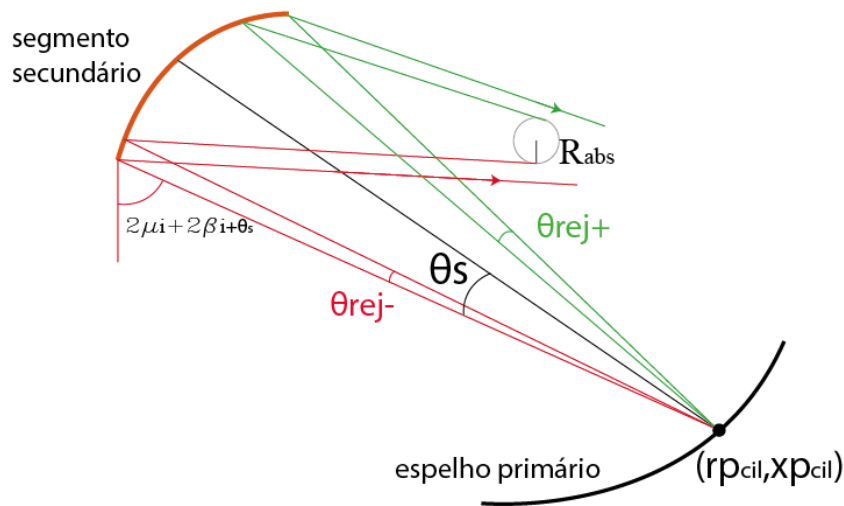
Desta forma, para cada ponto primário, variando  $\varphi$  do seu valor mínimo ao máximo, encontram-se os pontos secundários que satisfazem a equação:

$$rs_{cil} = rp_{cil} + (xp_{cil}-xs_{cil})\tan(2\mu_i + 2\beta) \quad (72)$$

Considerando o semiângulo de abertura do cone solar, deve-se variar, para cada ponto primário, a inclinação do raio incidente no intervalo de  $-\theta_s$  a  $+\theta_s$ , como mostrado na Figura 35. A figura mostra (aproximando o secundário do primário para melhorar o entendimento) um segmento iluminado do secundário, que compreende toda a variação de  $\theta_s$ . Isto implica no acréscimo de  $\theta_s$  ao valor do ângulo  $2\mu_i + 2\beta$ , e novos pontos  $(rs_{cil}, xs_{cil})$  correspondentes a cada valor de  $\theta_s$  no intervalo de  $-\theta_s$  a  $+\theta_s$  podem ser calculados fazendo:

$$rs_{cil} = rp_{cil} + (xp_{cil}-xs_{cil})\tan(2\mu_i + 2\beta + \theta_s) \quad (73)$$

Figura 35 – Aproximação entre um segmento secundário iluminado pelo cone da radiação e o espelho primário para entendimento das perdas por rejeição.



Fonte: O autor (2022).

A incidência ou não no absorvedor deve ser testada para cada valor de  $\theta_s$  de forma a computar o valor de  $\theta_{rej}$  total. Para a Figura 35, o intervalo angular do cone rejeitado é  $\theta_{rej} =$

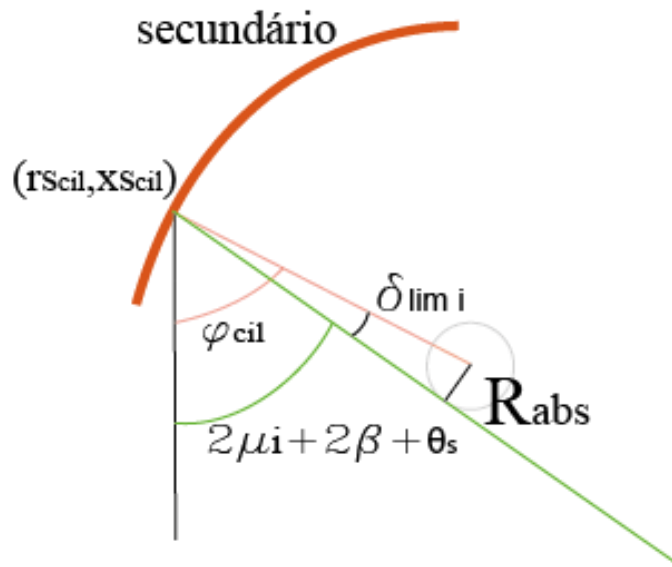
$\theta_{rej+} + \theta_{rej-}$ , e cada ponto contribui para as perdas por rejeição com uma fração  $\theta_{rej}/2\theta_s$ , segundo a integral:

$$Rej(\theta_t) = \frac{1}{r_{pcil\ max} - r_{pcil\ min}} \int_{r_{pcil\ min}}^{r_{pcil\ max}} \frac{\theta_{rej}(\theta_t)}{2\theta_s} dr \quad (74)$$

Com a variação das inclinações dos espelhos, o sombreamento entre eles começa a aparecer a partir de um certo valor de  $\theta_t$ . O sombreamento faz com que parte do espelho fique inutilizado. A largura sombreada por espelho pode ser calculada com o método descrito Seção 5.3.2. Com elas, é possível calcular os novos intervalos de valores para  $\beta$ , que muda a depender do espelho considerado. Os resultados apresentados na seção de resultados consideram a influência da sombra.

A descrição apresentada considera que todos os raios que entram na abertura do secundário tocam o secundário, como se o absorvedor fosse transparente. Todavia, alguns raios atingem o absorvedor diretamente. Para quantificá-los, considera-se um ângulo limite entre o raio que entra na abertura secundária e o raio auxiliar refletido no ponto  $(r_{scil}, x_{scil})$  que atinge o centro do absorvedor e faz um ângulo  $\varphi_{cil}$  com a normal, como mostrado na Figura 36.

Figura 36 – Ângulo limite para incidência direta no absorvedor após uma reflexão.



Fonte: O autor (2022).

Tem-se que o ângulo limite tem valor:

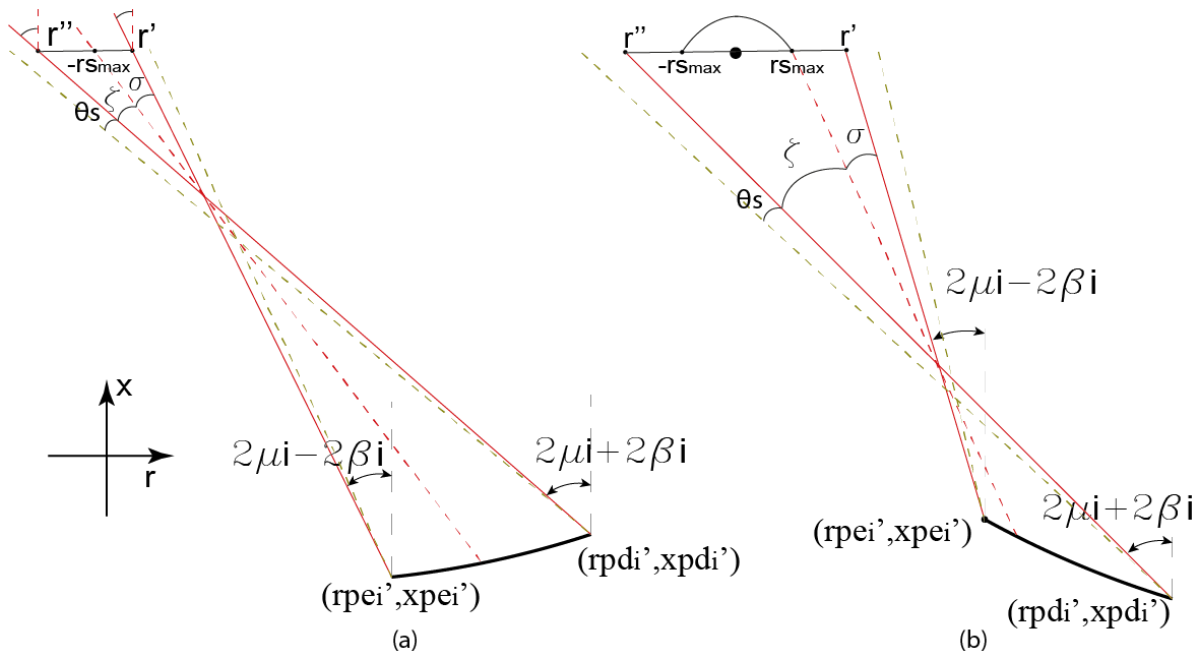
$$\delta_{\text{lim}} = \tan^{-1} \frac{R_{\text{abs}}}{\sqrt{x s_{\text{cil}}^2 + r s_{\text{cil}}^2}} \quad (75)$$

Desta forma, para  $\varphi_{\text{cil}} - (2\mu i + 2\beta + \theta_s) < \delta_{\text{lim}}$ , os raios refletidos pelo espelho que entram na abertura do secundário tocam o absorvedor diretamente.

### 5.4.3 Dispersão

Com a variação do  $\theta_t$  e a mudança no ângulo de inclinação dos espelhos, o foco do espelho cilíndrico se aproxima do primário e o valor da largura  $h$  (ver Cap. 4) projetada sobre o secundário por espelho cresce. Desta forma, a radiação total refletida se espalha sobre o secundário. Para os espelhos mais afastados do absorvedor, isso pode implicar em energia refletida para fora do secundário, como mostrado na Figura 37, configurando as perdas por dispersão.

Figura 37 – Perdas por dispersão.



Fonte: O autor (2022).

Para quantificar a energia que não entra na abertura secundária, duas coordenadas auxiliares são utilizadas. Uma referente à borda esquerda do espelho,  $r'$ , e a outra referente à borda direita,  $r''$ , que podem ser calculadas através das equações:

$$\begin{cases} r_i' = r_{pe'i} - (x_{s\max} - x_{pe'i})\tan(2\mu_i - 2\beta_i - \theta_s) \\ r_i'' = r_{pd'i} - (x_{s\max} - x_{pd'i})\tan(2\mu_i + 2\beta_i + \theta_s) \end{cases} \quad (76)$$

Na Figura 37,  $r'$  e  $r''$  estão referenciados ao raio central e a semiabertura  $\theta_s$  do cone solar deve ser considerada para determinar seus valores. O problema reduz-se a testar se os valores de  $r'$  e  $r''$  estão contidos dentro dos limites da abertura secundária. Isto é, se estão no intervalo que vai de  $-r_{s\max}$  a  $r_{s\max}$ .

Caso os valores de  $r'$  ou  $r''$  estejam fora dos limites da abertura secundária, os ângulos  $\zeta$  e  $\sigma$  são utilizados para determinar o percentual de energia perdida por dispersão. Da análise geométrica contida na Figura 37, é possível obter um sistema de equações que possibilitam a determinação dos valores de  $\zeta$  e  $\sigma$ :

$$\begin{cases} \frac{(-r_{s\max} - r') \sin(\pi/2 - 2\mu_i - 2\beta_i - \theta_s)}{\sin \zeta} = \frac{(r'' + r_{s\max}) \sin(\pi/2 - 2\mu_i - 2\beta_i - \theta_s)}{\sin \sigma} \\ \zeta + \sigma = 4\beta_i + 2\theta_s \end{cases} \quad (77)$$

O percentual de perdas por dispersão pode ser obtido fazendo os testes:

$$\begin{cases} D(\%) = \frac{\zeta}{\sum_{i=-5}^5 \beta_{\text{total } i}}, \text{ se } r'' < -r_{s\max} \\ D(\%) = \frac{\sigma}{\sum_{i=-5}^5 \beta_{\text{total } i}}, \text{ se } r' > r_{s\max} \\ D(\%) = \frac{\zeta}{\sum_{i=-5}^5 \beta_{\text{total } i}} + \frac{\sigma}{\sum_{i=-5}^5 \beta_{\text{total } i}}, \text{ se } r'' < -r_{s\max} \text{ e } r' > r_{s\max} \end{cases} \quad (78)$$

na qual  $\beta_{\text{total } i}$  é a variação total de  $\beta$  por espelho já considerando o sombreamento entre espelhos. Para o lado esquerdo do concentrador a metodologia para cálculo é a mesma, e a dispersão total do concentrador é o somatório da dispersão associada a cada espelho.

## 5.5 FATOR DE INTERCEPTAÇÃO TRANSVERSAL

$\gamma(\theta_t)$  é determinado considerando:

1. Que a área efetiva do campo de espelhos primários reduz com a variação do ângulo de incidência. São as chamadas perdas por cosseno (do inglês, cosine losses), relacionado à frente de onda efetiva, FO;
2. As perdas para o solo ( $G(\theta_t)$ )
3. As perdas por bloqueio entre espelhos ( $B(\theta_t)$ )

4. As perdas por sombreamento secundário sobre o primário ( $S(\theta_t)$ )
5. As perdas por rejeição de raios ( $Rej(\theta_t)$ )
6. As perdas por dispersão ( $D(\theta_t)$ )

e pode ser expresso como:

$$\gamma(\theta_t) = 1 - [G(\theta_t) + B(\theta_t) + S(\theta_t) + Rej(\theta_t) + D(\theta_t)] \quad (79)$$

## 5.6 FATOR DE INTERCEPTAÇÃO LONGITUDINAL

O fator de interceptação longitudinal é influenciado por dois parâmetros básicos:

1. O ângulo de elevação solar que é levado em consideração com a multiplicação pelo  $\cos \theta_L$  (BELLOS; TZIVANIDIS, 2018);
2. O efeito de borda (end losses), que é proporcional ao comprimento não iluminado do absorvedor (YANG, 2019);

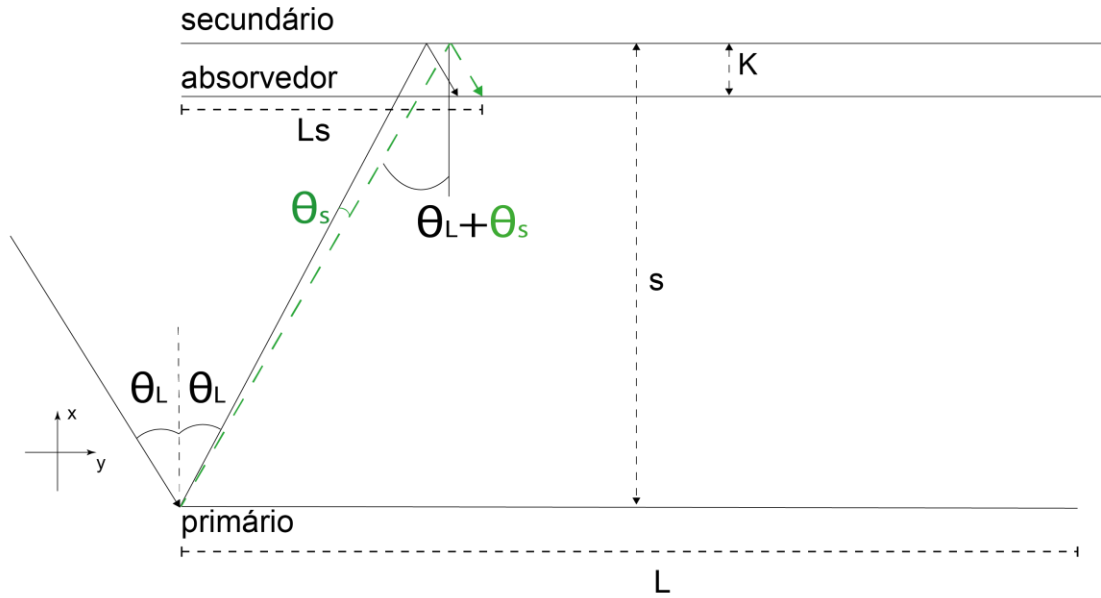
O efeito de borda é quando com a elevação solar alguns raios que entram na abertura do concentrador são perdidos para uma região além do comprimento do absorvedor (YANG, 2019).

Esta perda é proporcional ao comprimento não iluminado do absorvedor,  $L_s$ , mostrado na Figura 38.

O comprimento não iluminado do absorvedor,  $L_s$ , pode ser obtido fazendo:

$$L_s = (s_m + K_m) \tan(\theta_L + \theta_s) \quad (80)$$

Figura 38 – Comprimento não iluminado do absorvedor.



Fonte: O autor (2022).

A depender do espelho que reflete o raio, os valores de  $s$  e  $K$  podem variar, como mostrado na Figura 39. Desta forma, obtém-se o valor médio de  $s$  e  $K$ :

$$\begin{cases} s_m = \frac{1}{N_e} \sum_i^{N_e} s_i \\ K_m = \frac{1}{N_e} \sum_i^{N_e} K_i \end{cases} \quad (81)$$

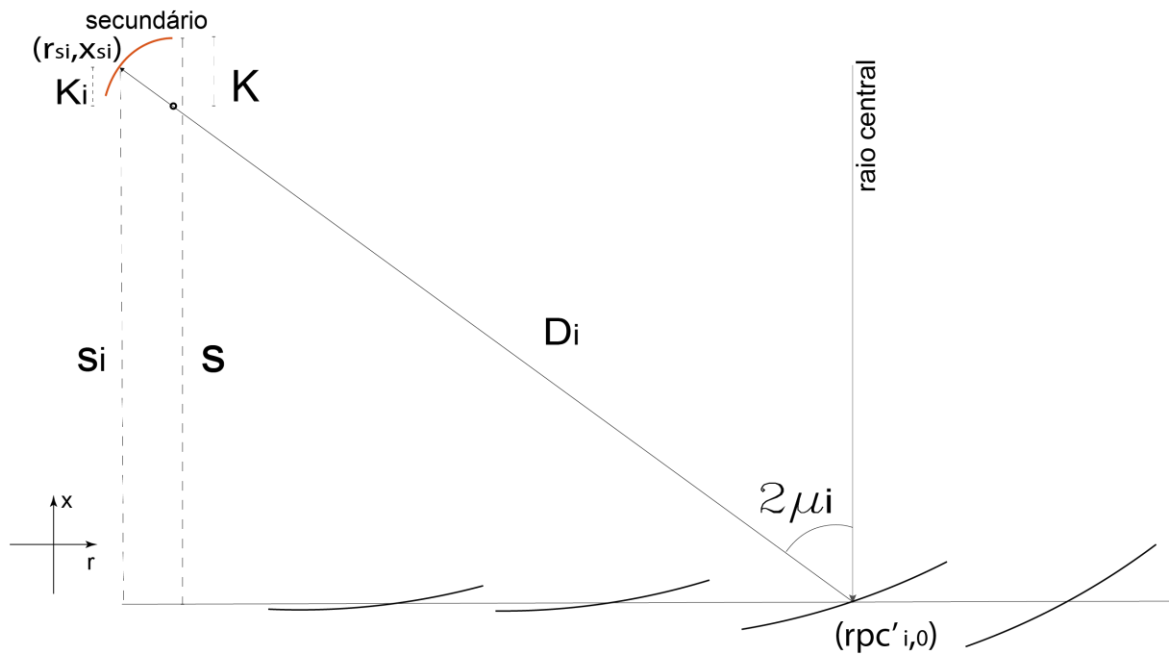
na qual,

$$\begin{cases} s_i = x_{si} \\ K_i = |K| - (|s| - s_i) \end{cases} \quad (82)$$

daí,

$$\begin{cases} K_m = \frac{1}{N_e} \sum_i^{N_e} [|K| - (|s| - s_i)] \\ s_m = \frac{1}{N_e} \sum_i^{N_e} x_{si} \end{cases} \quad (83)$$

Figura 39 – Variação relativa de  $\{s, K\}$  a depender do espelho refletor.



Fonte: O autor (2022).

A elevação solar deve ser considerada na determinação do fator de interceptação longitudinal, que pode ser obtido fazendo (BELLOS; TZIVANIDIS, 2018):

$$\gamma(\theta_L) = \cos(\theta_L + \theta_s) \left(1 - \frac{L_s}{L}\right) \quad (84)$$

e

$$\gamma(\theta_L) = \left( \cos(\theta_L + \theta_s) - \frac{(sm + Km) \sin(\theta_L + \theta_s)}{L} \right) \quad (85)$$

## 5.6 RESULTADOS

O ponto de partida para o levantamento do espaço paramétrico do CLFA ( $\{s = -1, 0, K = -0, 1\}$ ) foi baseado nos resultados apresentados no Cap. 4, no qual os testes se limitaram a variar o parâmetro  $s$ , mantendo  $K = -0, 1$ . Agora, conhecendo de forma mais detalhada as características do CLFA a partir das descrições analíticas apresentadas,  $K$  e  $s$  foram variados em conjunto, de modo a obter concentradores com  $C$  na faixa de 35-50, excedendo visivelmente os valores usados em PTCs comerciais convencionais.

Os projetos de CLFA de desempenho superior nas duas concentrações definidas foram escolhidos, inicialmente, com base em testes para  $\gamma (0, 0)$ , que norteiam a identificação inicial das melhores configurações. Depois,  $\gamma$  foi avaliado analiticamente - e validado por traçado de raios - de modo mais completo através da dependência angular dos ângulos de incidência projetados.

Todos os cálculos e simulações são para distribuição probabilística total constante (pillbox), com  $\theta_s = 9$  mrad, em CLFAs onde os espelhos primários estão à mesma altura, próximo ao nível do solo, possuindo curvaturas cilíndricas calculadas conforme procedimento descrito no Cap. 4. Ressalta-se, ainda, que todos os fatores de interceptação foram calculados considerando a entrada solar estendida, ou seja, não para uma frente de onda colimada, mas sim para um cone de radiação centrado no ângulo de incidência para cada valor de abscissa. Para todas as simulações, o número de espelhos foi  $N_e = 5$ , diferente do capítulo anterior, onde considerou-se 6 espelhos de cada lado. A redução no número de espelhos visou a simplificação do concentrador e foi motivada pela pouca alteração vista nos resultados. O traçado de raios foi implementado considerando  $10^6$  raios, em consonância com os testes observados na literatura (Santos et al., 2021; Zhu e Lewandowski, 2012).

A abertura total do CLFA depende dos parâmetros  $\{s, K\}$  escolhidos. O valor da abertura, associado ao  $R_{abs}$  definem a concentração. É importante ressaltar que existem combinações  $\{s, K\}$  que resultam em valores de concentração equivalentes, mas com fatores de interceptação diferentes.

Fixou-se o  $R_{abs} = 9,5$  mm de modo que um valor de  $C = 50$  corresponde a uma semiabertura do campo primário de 1480 mm (área bruta e não simplesmente a área líquida dos espelhos primários), que é o CLFA obtido para  $s = -1$  e  $K = -0, 1$ . Inicialmente, analisa-se os resultados para tal configuração, mostrado na Figura 40, com fator de interceptação máximo nos valores de  $C = 50$  e  $\varphi_{max} = 85^\circ$ .

Figura 40 – CLFA com parâmetros  $\{-1; -0,1\}$  e  $C = 50$ .

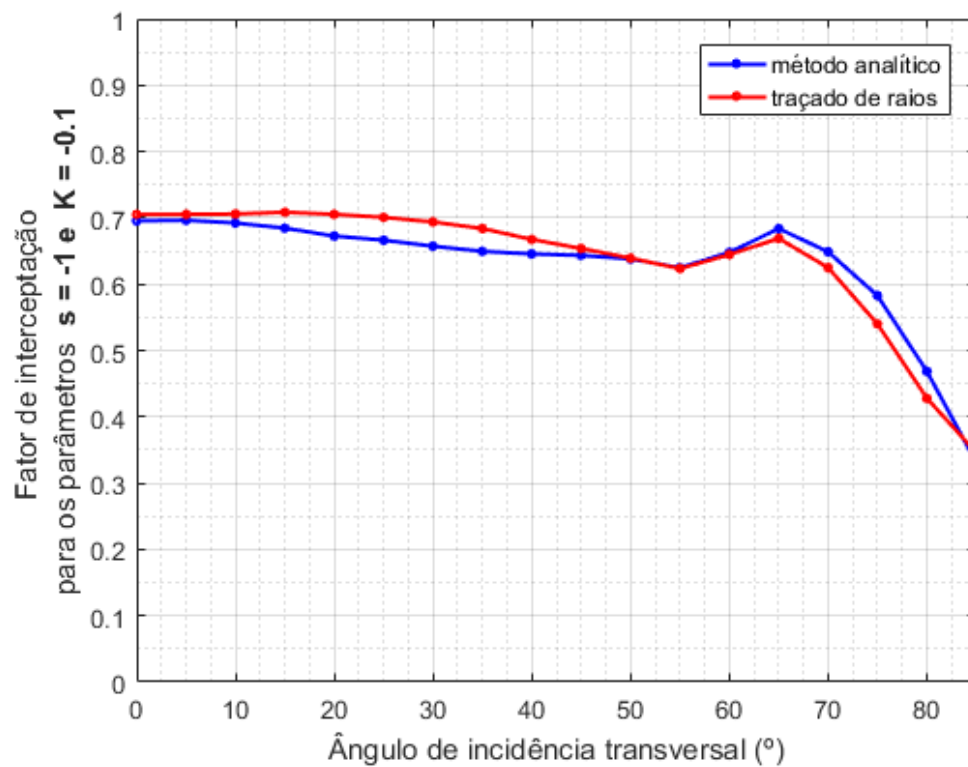


Fonte: obtida através do software SolTrace (2022).

Para perspectiva prática, considerando absorvedores comerciais de 35 mm de raio, e definindo um fator de multiplicação obtido da relação entre absorvedor real e teórico ( $35/9,5$ ), o CLFA  $\{-1; -0,1\}$  teria uma abertura real de aproximadamente 11 m, com altura real do absorvedor de 3,7 m. A baixa altura do absorvedor representa uma vantagem prática, tendo como desvantagem a inserção de perdas ópticas transversais que comprometem o desempenho óptico total do sistema como apresentado no Apêndice e nos resultados a seguir.

A Figura 41 mostra o fator de interceptação em função da variação da projeção transversal do CLFA  $\{-1; -0,1\}$ , com  $C = 50$  e  $\varphi_{\max} = 85^\circ$ . Observa-se que o fator de interceptação transversal cai até aproximadamente  $60^\circ$ , e depois melhora, já que a sombra do concentrador secundário deixa de ser projetada sobre o primário.

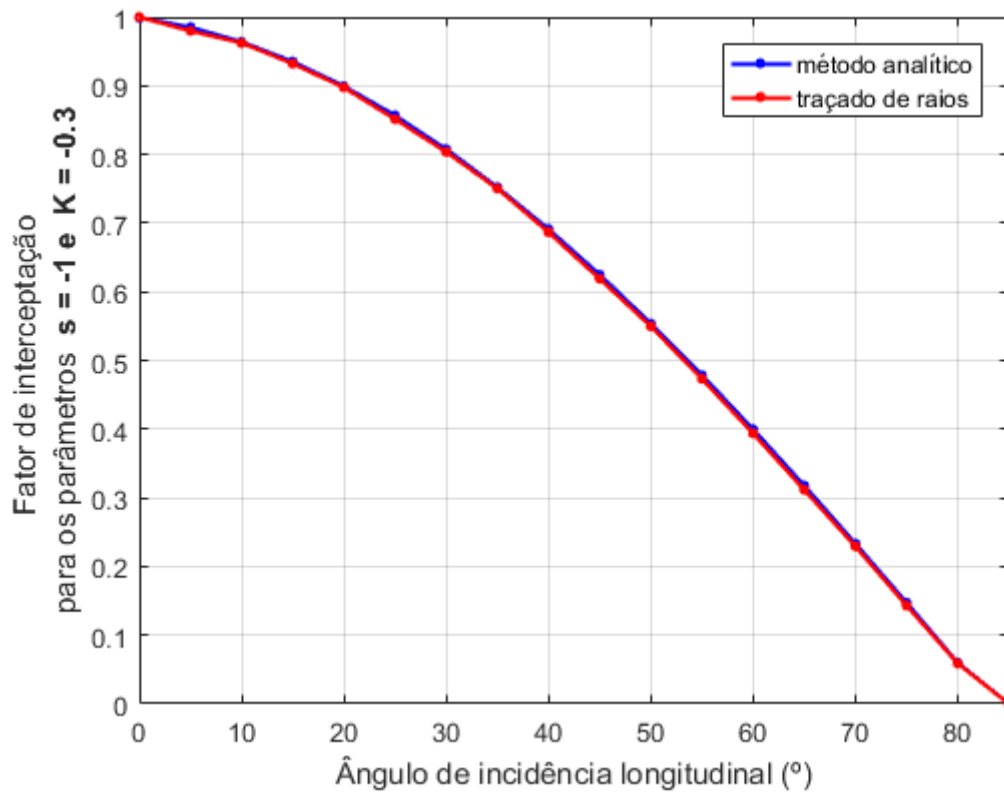
Figura 41 – Fator de interceptação em função da variação da projeção transversal do ângulo de incidência. CLFA com parâmetros  $s = -1$ ,  $K = -0,1$  e  $C = 50$ .



Fonte: O autor (2022).

A Figura 42 mostra o bom desempenho do fator de interceptação longitudinal CLFA  $\{-1; -0,1\}$ , que é superior ao CLFA  $\{-2,2; -0,03\}$  apresentado na sequência, devido à menor altura do conjunto absorvedor/secundário. Isto é, levando-se em conta a Equação 85, o termo  $(s_m + K_m)$  é aproximadamente duas vezes menor no CLFA  $\{-1; -0,1\}$ , impactando menos no fator de interceptação longitudinal.

Figura 42 – Fator de interceptação em função da variação da projeção longitudinal do ângulo de incidência.  
CLFA com parâmetros  $s = -1$ ,  $K = -0,1$  e  $C = 50$ .

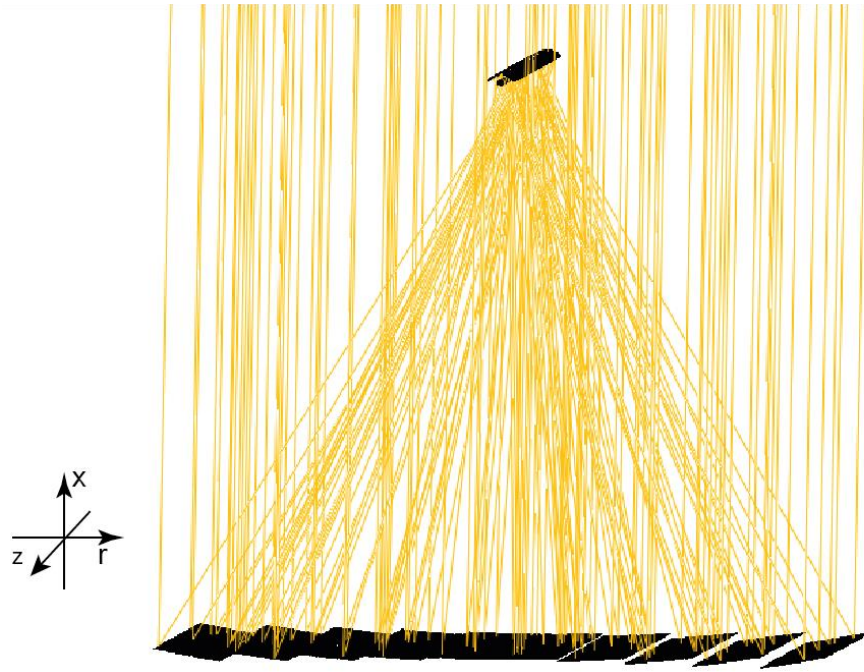


Fonte: O autor (2022).

Fixando novamente o  $R_{abs} = 9,5$ , um valor de  $C = 35$  corresponde a uma semiabertura do campo primário de 1054 mm, obtida para  $s = -1$  e  $K = -0,1$ . A partir de agora, analisa-se os resultados para tal configuração, mostrada na Figura 43, com fator de interceptação máximo nos valores de  $C = 35$  e  $\phi_{max} = 85^\circ$ .

Considerando absorvedores comerciais de 35 mm, e usando o fator de multiplicação definido para o concentrador analisado anteriormente, o CLFA  $\{-2,2; -0,03\}$  teria uma abertura real de aproximadamente 7,8 m, com altura do absorvedor de 8,1 m. A altura mais elevada do absorvedor representa uma desvantagem prática em relação ao concentrador anterior, não sendo tão alto quando comparada a altura de projetos da literatura com eficiência óptica parecida. Pode-se dizer que outra desvantagem é a inserção de perdas ópticas longitudinais. Entretanto, estas não comprometem o desempenho óptico total do sistema, que apresenta desempenho transversal muito superior dentre os concentradores analisados, como apresentado no Apêndice e nos resultados a seguir.

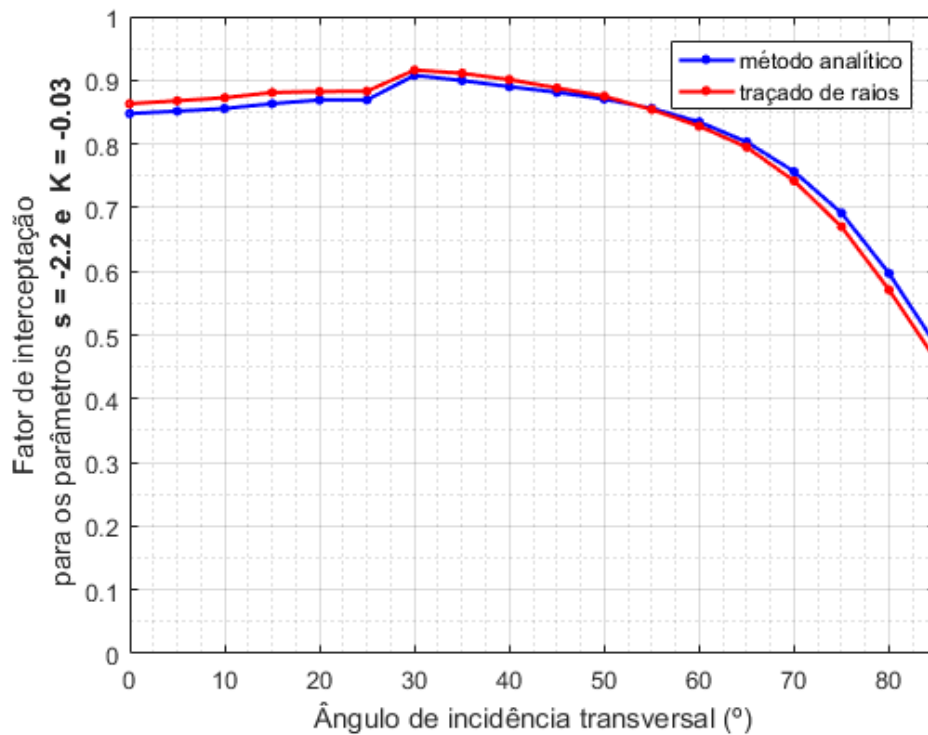
Figura 43 – CFLA com parâmetros  $\{-2,25; -0,03\}$  e  $C = 35$ .



Fonte: obtido através do software SolTrace (2022).

A Figura 44 mostra o fator de interceptação em função da variação da projeção transversal do ângulo de incidência para o CLFA  $\{-2,2; -0,03\}$ , com  $C = 35$  e  $\varphi_{\max} = 85^\circ$ . Observa-se que o fator de interceptação transversal fica acima de 0,9 em  $\theta_t = 35^\circ$ . Isto porque a sombra do concentrador secundário deixa de ser projetada sobre o primário, evidenciando que absorvedores mais altos resultam em menores perdas por sombreamento secundário.

Figura 44 – Fator de interceptação em função da variação da projeção transversal do ângulo de incidência. CLFA com parâmetros  $s = -2,2$ ,  $K = -0,03$  e  $C = 35$ .

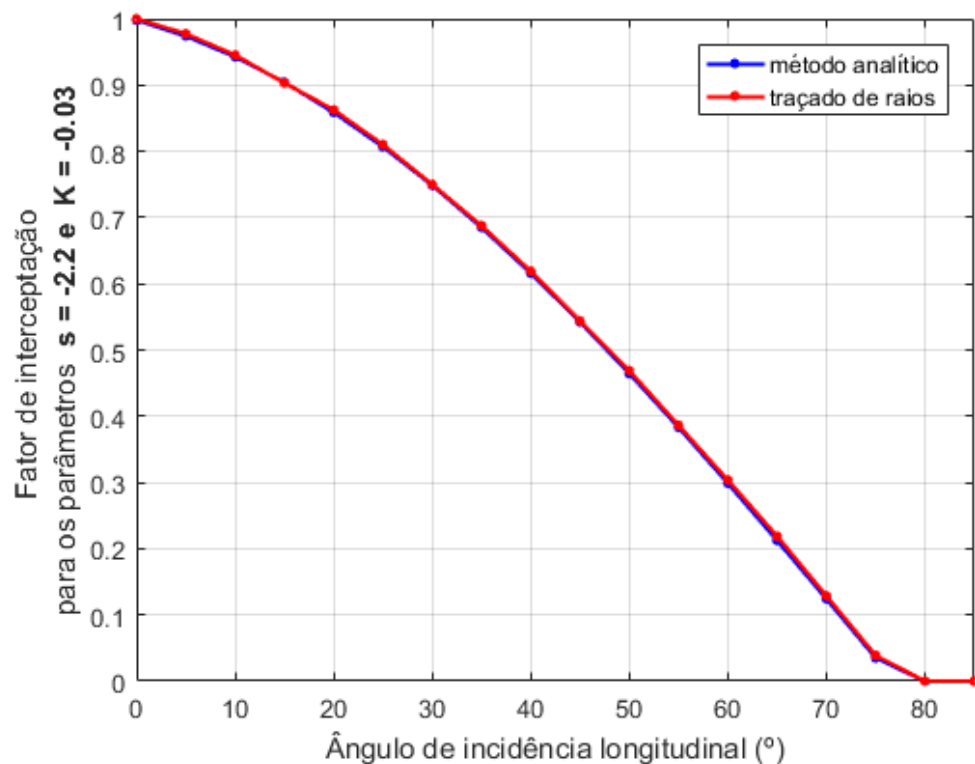


Fonte: O autor (2022).

A Figura 45 mostra o bom desempenho do fator de interceptação longitudinal CLFA  $\{-2,2; -0,03\}$ . Apesar de ser inferior ao CLFA  $\{-1; -0,1\}$  apresentado anteriormente devido à maior altura do conjunto absorvedor/secundário, não é suficientemente ruim ao ponto de comprometer o desempenho total do sistema.

Para organização do trabalho, os resultados das contribuições de cada fonte individual de perda óptica em ambas as configurações são apresentados no Apêndice (seção 6). Com os mecanismos de perda óptica sendo expressos por fórmulas analíticas (em vez de exigir simulação de traçado de raios), pôde-se descobrir, por exemplo, de forma rápida e transparente, que as perdas para o solo podem ser reduzidas a menos de 1 % (para todos os valores de  $\theta$ ), e as perdas de bloqueio para menos de 5 %. Percebe-se também uma redução considerável das perdas por rejeição e por dispersão quando se compara os dois projetos analisados. Observa-se também que as perdas devido ao sombreamento secundário ficam abaixo de 5 % para o CLFA  $\{-2,2; -0,03\}$ , não havendo mais sombra a partir de  $\theta_t = 35^\circ$ , enquanto para o CLFA  $\{-1; -0,1\}$  a perda por sombreamento secundário é superior a 7 % até  $\theta_t = 60^\circ$ .

Figura 45 – Fator de interceptação em função da variação da projeção longitudinal do ângulo de incidência. CLFA com parâmetros  $s = -2,2$ ,  $K = -0,03$  e  $C = 35$ .



Fonte: O autor (2022).

Os resultados mostram que o aumento da concentração implica em aumentar as perdas ópticas transversais, e melhorar o ganho óptico longitudinal, pois a altura do conjunto absorvedor/secundário é menor. A curva de fator de interceptação longitudinal a uma concentração  $C = 50$  (CLFA  $\{-1; -0,1\}$ ) alcança valores superiores quando comparado ao CLFA  $\{-2,2; -0,03\}$  com  $C = 35$ . Entretanto, não é suficiente para superar a coleta de energia total verificada no CLFA  $\{2,2; -0,03\}$ , que apresenta fator de interceptação acima de 0,84 na incidência normal, superando 0,9 quando a sombra secundária deixa o primário, desempenho superior ao concentrador analisado no Cap. 4 e às calhas parabólicas comerciais.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, concentradores Fresnel aplanáticos com elevado desempenho foram identificados.

A identificação de configurações práticas de concentradores solares de alto desempenho é tipicamente realizada por um procedimento numérico iterativo. Uma categoria central de projeto óptico é adotada (por exemplo, PTC ou LFR, incluindo uma variedade de ópticas de concentradores secundários) e seus parâmetros de projeto geométrico afetam os ganhos ópticos (isto é, aumentam o fator de interceptação). Desta forma, os projetos obtidos da variação desses parâmetros associados devem ser avaliados através de simulações numéricas de traçado de raios, que devem considerar milhões de raios para serem válidas. Os resultados são comparados, levando a decisões de projeto que podem maximizar o desempenho.

Basicamente, por tentativa e erro, os projetistas são guiados para uma configuração ideal. Entretanto esse tipo de avaliação enxerga apenas o produto (fator de interceptação), não detalhando as fontes de perdas ópticas e não evidenciando como elas podem ser mitigadas sem comprometer a viabilidade prática do projeto.

A natureza computacionalmente complicada do processo exige longo tempo até chegar a projetos aparentemente ótimos. Caso o impacto das perdas ópticas individuais precise inevitavelmente ser avaliado, o processo é ainda mais lento, pois elas só podem ser quantificadas executando simulações de traçado de raios específicas para esta finalidade. O tempo de computação é ainda mais crucial na avaliação do concentrador quando se considera a variação do ângulo de incidência.

Isso leva à busca por uma metodologia completamente analítica onde fórmulas para cada perda óptica são derivadas e podem ser avaliadas individualmente sem a necessidade de traçado de raios.

Uma gama completa de resultados analíticos foi derivada para o CLFA, e, além da capacidade de identificar e quantificar cada mecanismo de perda expressamente e com uma compreensão física clara, pode-se economizar tempo significativo no procedimento de projeto. Ao comparar o tempo necessário com a modelagem analítica versus o modo iterativo com simulações numéricas de traçado de raios, descobriu-se que chegar a projetos CLFA de desempenho superior exige a ordem de segundos com modelagem analítica, em comparação com horas via traçado de raios.

Os LFRs em geral - e o CLFA em particular - têm fatores de interceptação que apresentam uma dependência marcadamente diferente dos dois ângulos de incidência projetados, transversal e longitudinal (análogo ao comportamento correspondente dos PTCs). Invariavelmente, essas dependências - comumente chamadas de modificadores de ângulo de incidência - devem ser computadas numericamente por meio de simulação de traçado de raios. Assim, derivam-se fórmulas analíticas que representam o comportamento das fontes de perdas ópticas e, conseqüentemente, do fator de interceptação em função dos dois ângulos de incidência projetados.

Pôde-se observar rapidamente que o CLFA com parâmetros  $s = -2,2$ ,  $K = -0,03$  e  $\varphi_{\max} = 85^\circ$  apresenta o melhor desempenho na incidência normal, com  $\gamma = 0,84$ . Observa-se que o fator de interceptação do concentrador supera 0,9 quando a sombra do secundário deixa o primário. O concentrador apresenta desempenho inferior quando se observa individualmente a variação longitudinal do fator de interceptação devido à maior altura do conjunto secundário/absorvedor. Quando se analisa de forma combinada a variação do fator de interceptação transversal e longitudinal, pode-se afirmar que o CLFA  $\{-2,2; -0,03\}$  é o melhor concentrador dentre os analisados. Em termos de concentração, o CLFA  $\{-2,2; -0,03\}$  apresenta  $C = 35$ , que não é a maior dentre os projetos analisados, mas é bem superior às calhas parabólicas comerciais. E, para perspectiva prática, considerando um absorvedor comercial de 35 mm, a abertura total do concentrador será de 7,8 m, com altura de 8,1 m do conjunto absorvedor/secundário, que não é tão alta quando os projetos de maior eficiência óptica disponíveis na literatura são usados para comparação.

O desempenho do concentrador e a determinação das configurações ideais dependem da localização, ou seja, disponibilidade solar, latitude e clima local (Rabl, 1985). As ferramentas analíticas derivadas aqui fornecem os principais resultados ópticos necessários para avaliar o desempenho de um CLFA em qualquer localidade. Devido à natureza específica de cada caso, a análise do desempenho para diferentes latitudes é delegada a estudos futuros de projetos adaptados a regiões e requisitos específicos.

Quase todas as fontes individuais de perda óptica do CLFA são as mesmas para os LFRs: bloqueio, dispersão, sombreamento do primário pelo secundário, perdas para o solo e perdas por dispersão, bem como o impacto do sombreamento entre espelhos. Desta forma, as fórmulas analíticas derivadas aqui são igualmente aplicáveis a todos os estudos de LFR. A única fonte de perda óptica que difere é a rejeição de raios dentro do concentrador secundário, que, claramente, é uma função sensível ao contorno desse espelho e à metodologia de projeto.

Para o CLFA, há apenas uma única reflexão no secundário, enquanto que secundários não formadores de imagem, comuns a outros LFRs, admitem múltiplas reflexões.

As ferramentas analíticas desenvolvidas resultam numa gama de possibilidades de estudos de otimização futuros que abrirão outras possibilidades de projeto e da engenharia para o desenvolvimento de um protótipo do CLFA

Por fim, as restrições práticas impostas aos projetos analisados aqui são comuns às usinas solares LFR comerciais convencionais. Pode haver limitações diferentes ou adicionais para futuros sistemas personalizados, caso em que a abordagem analítica derivada forneceria aos projetistas a capacidade de ver e quantificar imediatamente qualquer fonte de perda óptica de importância determinante diante de tais restrições.

## REFERÊNCIAS

- AL-GHUSSAIN, L, AHMAD, D. A., ABUBAKER, A. M., HASSAN, M. A (2022). **Techno-economic feasibility of thermal storage systems for the transition to 100% renewable grids**, Renewable Energy, Elsevier, v. 189, p. 800-812.
- AWAN, A. B., ZUBAIR, M., PRAVEEN, R. P., BHATTI, A. R (2019). **Design and comparative analysis of photovoltaic and parabolic trough based CSP plants**. Solar Energy, Elsevier, v. 183, p. 551-565.
- BELLOS, E (2019). **Progress in the design and the applications of linear Fresnel reflectors - A critical review**, Therm. Sci. Eng. Prog., Elsevier, v. 10, p. 112-137.
- BELLOS, E., TZIVANIDIS, C. (2018). **Assessment of linear solar concentrating technologies for Greek climate**. Energ. Convers. Manage., Elsevier, v. 171, p. 1502-1513.
- BELLOS, E., TZIVANIDIS, C., PAPADOPOULOS, A. (2018). **Secondary concentrator optimization of a linear Fresnel reflector using Bezier polynomial parametrization**. Solar Energy, Elsevier, v 171, p. 716-727.
- BENDT, P., RABL, A., GAUL, H. W.; REED, K. A. (1979). **Optical Analysis and Optimization of Line Focus Solar Collector**. Solar Energy Research Institute, Golden, CO, p. 76.
- BENÍTEZ, P., GARCIA, R., MIÑANO, J.C. (1997). **Contactless efficient two-stage solar concentrators for tubular absorber**. Appl. Opt., v. 36, p. 7119–7124.
- CANAVARRO, D., CHAVES, J., COLLARES-PEREIRA, M. (2013). **Infinitesimal etendue and Simultaneous Multiple Surface (SMS) concentrators for fixed receiver troughs**. Sol. Energy, v. 97, p. 493–503.
- CANAVARRO, D., CHAVES, J., COLLARES-PEREIRA, M. (2014). **Simultaneous multiple surface method for linear Fresnel concentrators with tubular receiver**. Solar Energy, Elsevier, v. 110, p. 105-116.
- CANAVARRO, D., CHAVES, J., COLLARES-PEREIRA, M. (2016). **A novel compound elliptical-type concentrator for parabolic primaries with tubular receiver**. Sol. Energy, Elsevier, v. 134, p. 383–391.
- CANAVARRO, D., CHAVES, J., COLLARES-PEREIRA, M. (2017). **New dual asymmetric CEC linear Fresnel concentrator for evacuated tubular receivers**. AIP Conf. Proc., p. 1850, 040001.
- CASARTELLI, D., BINOTTI, M., SILVA, P., MACCHI, E., ROCCARO, E., PASSERA, T. (2015) **Power block off-design control strategies for indirect solar ORC cycles**. Enrgy. Proced., Elsevier, v. 69, p. 1220-1230.
- CHAVES, J., COLLARES-PEREIRA, M. (2012). **Etendue-matched two-stage concentrators with multiple receivers**. Solar Energy, Elsevier, v. 84, p. 196–207.

CHEN, X., WANG, F., YAN, X., CHENG, Z., HAN, Y., JIE, Z. (2018). **Thermal and chemical analysis of methane dry reforming in a volumetric reactor under highly concentrated solar radiation**. Solar Energy, Elsevier, v. 162, p. 187–195.

COCCO, D., CAU, G. (2015). **Energy and economic analysis of concentrating solar power plants based on parabolic trough and linear Fresnel collectors**. J. Power and Energy, v. 229, p. 677–688.

COLLARES-PEREIRA, M., GORDON, J. M., RABL, A., WINSTON, R. (1991). **High concentration two stage optics for parabolic trough solar collectors with tubular absorber and large rim angle**. Sol. Energy, v. 47, p. 457–466.

EPE (2021). **Balanço Energético Nacional (BEN) 2021: Ano base 2020**. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/>>. Acesso em: 30 de março de 2022.

EUDORA (2022). **Energia Heliotérmica CSP**. Eudora Energia. Disponível em <<https://eudoraenergia.com.br/solucoes-energia-heliotermica-csp>>. Acesso em: 17 de março de 2022.

EUSÉBIO, T. R. (2017). **Produção combinada de calor, frio e eletricidade com energia solar concentrada em edifícios de serviços**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Ciências, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Universidade de Lisboa. Lisboa, p. 133.

FEUERMAN, D., GORDON, J. M. (1991). **Analysis of a two-stage linear fresnel reflector solar concentrator**. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, v. 113, n. 4, p. 272-279.

FRAIDENRAICH, N., LYRA, F. (1995). **Energia Solar: fundamentos e tecnologia de conversão heliotérmica e fotovoltaica**, Ed. Universitária da UFPE, Recife, p. 56-67.

GEE, R., BROST, R., ZHU, G., JORGENSEN, G. (2010). **An improved method for characterizing reflector specularity for parabolic trough concentrators**. In: Proc. 16<sup>th</sup> Solar PACES Conf., 21-24 de setembro, Perpignan, France, v. 2124, p. 1-8.

GIOSTRI, A., BINOTTI, M., SILVA, P., MACCHI, E., MANZOLINI, G. (2013). **Comparison of two linear collectors in solar thermal plants: parabolic trough versus Fresnel**. J. Solar Energy Eng., ASME, v. 135, p. 1-11.

GOLDSTEIN, A., GORDON, J. M. (2011). **Tailored solar optics for maximal optical tolerance and concentration**. Solar Energy Mat. & Sol. C., Elsevier, v. 95, p. 624-629.

GOMES, E. T. A., FRAIDENRAICH, N., VILELA, O. C., OLIVEIRA, C. A. A., GORDON, J. M. (2019). **Aplanats and analytic modeling of their optical properties for linear solar concentrators with tubular receivers**. Sol. Energy, Elsevier, v. 191, p. 697-706.

GORDON, J. M. (2010). **Aplanatic optics for solar concentration**. Optics Express, v. 18, p. A41-A52.

GORDON, J. M., FEUERMANN, D. (2005). **Optical performance at the thermodynamic limit with tailored imaging designs**. Appl. Opt., v. 44, n. 12, p. 2327–2331.

GORDON, J. M., FEUERMANN, D., YOUNG, P. (2008). **Unfolded aplanats for high-concentration photovoltaics**. Opt. Lett., v. 33, n. 10, p. 1114–1116, 2008.

GUDE, V. G. (2018). **Use of exergy tools in renewable energy driven desalination systems**, Thermal Sci. Eng. Prog., Elsevier, v. 8, p. 154–170.

HACK, M., ZHU, G., WENDELIN, T. (2017). **Evaluation and comparison of an adaptive method technique for improved performance of linear Fresnel secondary designs**. Applied Energy, Elsevier, v. 208, p. 1441-1451.

HANM, H. (2011). **Spherical aberration: Rays A, B and C are focusses in FA, FB en FC respectively**. Retirado do Wikimedia Commons, repositório de mídia gratuito, sob a licença CC BY-SA 3.0. Disponível em: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spherical\\_aberration\\_3.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spherical_aberration_3.svg)>. Acesso em: 25/03/2022.

HEAD, A. K. (1957). **The two-mirror aplanat**. Proc. Phys. Soc. London Sec. B, v. 70, n. 10, p. 945–949.

HELIOSCSP (2020). **Concentrated solar power had a global total installed capacity of 6,451 MW in 2019**. Helios CSP – Solar Thermal Energy News. Disponível em: <<https://helioscsp.com/concentrated-solar-power-had-a-global-total-installed-capacity-of-6451-mw-in-2019/>>. Acesso em 17 de março de 2022.

HELIOSCSP (2022). **The first Concentrated Solar Power plant in Brazil will come into operation at the end of January**. Helios CSP – Solar Thermal Energy News. Disponível em: <<https://helioscsp.com/the-first-concentrated-solar-power-plant-in-brazil-will-come-into-operation-at-the-end-of-january/>>. Acesso em: 17 de março de 2022.

HONGN, M., LARSEN, S. F., GEA, M., ALTAMIRANO, M. (2015) **Least square based method for the estimation of the optical end loss of linear Fresnel concentrators**. Sol. Energy, Elsevier, v. 111, p. 264-276.

HORTA, P., COLLARES-PEREIRA, M., CANAVARRO, D., GUERREIRO, L. (2011). **Modeling thermal losses in a new CLFR etendue matched non-evacuated collector cavity**. In: Presented at the 17th SolarPACES International Symposium, Granada, Spain.

HONGN, M., LARSEN, S. F. (2018). **Hydrothermal model for small-scale linear Fresnel absorbers with non-uniform stepwise solar distribution**. Appl. Energy, v. 223, p. 329–346, 2018.

HOWELL, J. R., MENGÜÇ, M.P., DAUN, K., SIEGEL, R. (2020). **Thermal radiation heat transfer**. CRC Press, 7. ed., p. 1040.

HUANG, F., Li, L., HUANG, W. (2014). **Optical performance of an azimuth tracking linear Fresnel solar concentrator**. Sol. Energy, v. 108, p.1–12.

IEA (2021). **Global Energy Review 2021**. Internacional Energy Agency. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021/renewables>>. Acesso em: 16 de março de 2022.

IEA (2021). **Concentrated Solar Power (CSP)**. Internacional Energy Agency. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/concentrated-solar-power-csp>>. Acesso em: 22/03/2022.

IEA (2022). **Policies database**. Internacional Energy Agency. Disponível em: <<https://www.iea.org/policies>>. Acesso em: 17 de março de 2022.

ISLAM, R., BHUIYAN, A. B. M. N., ULLAH, M. W. (2017). **An overview of Concentrated Solar Power (CSP) technologies and its opportunities in Bangladesh**. International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE), Cox's Bazar, pp. 844-849.

KOST, C., SHAMMUGAM, S., JÜLCH, V., NGUYEN, HT., SCHLEGL, T. (2018). **Levelized cost of electricity renewable energy technologies**. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems Ise, Freiburg, p. 42.

LARA, F., VELÁZQUEZ, N., SAUCEDA, D., ACUÑA, A. (2013). **Metodología para el Dimensionamiento y Optimización de um Concentrador Lineal Fresnel**. Información Tecnológica, v. 24, n. 1.

LYNDEN-BELL, D. (2002). **Exact optics: a unification of optical telescope design**. Mon. Not. R. Astron. Soc. v. 334, n. 4, p. 787–796.

MA, J., CHANG, Z. (2018). **Understanding the effects of end-loss on linear Fresnel collectors**. IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci., v. 121.

MACHINDA, G. T., CHOWDHURY, S., ARSCOTT, R., CHOWDHURY, S. P., KIBAARA, S. (2011). **Concentrating Solar Thermal Power Technologies: A review**. Annual IEEE India Conference, p. 1-6.

MANIKANDAN, G.K., INIYAN, S., RANKO, G. (2019). **Enhancing the optical and thermal efficiency of a parabolic trough collector – a review**. Appl. Energy 235, 1524–1540.

MANIKUMAR, R., ARASU, A. V. (2014). **Heat loss characteristics study of a trapezoidal cavity absorber with and without plate for a linear Fresnel reflector solar concentrator system**. Renew. Energy, v. 63, p. 98–108.

MARSHALL, H., FEUERMAN, D., GORDON, J. M. (2015). **New types of refractive-reflective aplanats for maximal flux concentration and collimation**. Optics Express, v. 23, n. 24, p. 1541-1548.

MARTINS, F. R., ABREU, S. L., PEREIRA, E. B. (2012). **Scenarios for solar thermal energy applications in Brazil**. Energy Policy, Elsevier, v. 48, p. 640-649.

MCINTIRE, W.R. (1982). **Factor approximations for biaxial incident angle modifiers**. Sol. Energy, Elsevier, v. 29, p. 315-322.

MILLS, D., MORRISON, G. (2000). **Compact linear Fresnel reflector solar thermal power plants**. Solar Energy, Elsevier, v. 68, p. 262–283.

MILLS, D.R. (1995). **Two-stage solar collectors approaching maximal concentration**. Sol. Energy, Elsevier, v. 54, p. 41–47.

MISHRA, R. S., SINGH, H. (2018). **Detailed parametric analysis of solar driven supercritical CO<sub>2</sub> based combined cycle for power generation, cooling and heating effect by vapor absorption refrigeration as a bottoming cycle**. Thermal Sci. Eng. Prog., Elsevier, v. 8, p. 397–410.

MONTES, M. J., ABBAS, R., MUÑOZ, M., MUÑOZ-ANTÓN, J., MARTÍNEZ-VAL, J. M. (2017). **Advances in the linear Fresnel single-tube receivers: Hybrid loops with non-evacuated and evacuated receivers**. Energ. Convers. Manage., Elsevier, v. 149, p. 318-333.

MORIN, G., DERSCH, J., PLATZER, W., ECK, M., HÄBERLE, A. (2012). **Comparison of linear Fresnel and parabolic trough collector power plants**. Sol. Energy, Elsevier, v. 86, p. 1-12.

NIXON, J. D., DEY, P. K., DAVIES, P. A. (2013). **Design of a novel solar thermal collector using a multi-criteria decision-making methodology**. J. Clean. Prod, Elsevier, v. 59, p. 150-159.

NOOR (2022). **Project introduction**. Noor Energy 1. Disponível em: <<https://noorenergy.ae/>>. Acesso em: 16 de março de 2022.

NREL (2022). **Next-Gen Concentrating Solar Power Research Heats Up at NREL**. National Renewable Energy Laboratory, U. S. Department of Energy. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/news/program/2022/next-gen-concentrating-solar-power-research-heats-up-at-nrel.html>>. Acesso em: 16 de março de 2022.

NREL (2022). **Concentrating Solar Power Projects: Linear Fresnel Projects**. National Renewable Energy Laboratory, U. S. Department of Energy. Disponível em: <<https://solarpaces.nrel.gov/by-technology/linear-fresnel>>. Acesso em: 22 de março de 2022.

OLIVEIRA, J. A., FRAIDENRAICH, N., VILELA, O. C. (2015). **Sombra, bloqueio e área de perda de um concentrador linear Fresnel. Análise de sensibilidade**. Revista Brasileira de Energia Solar, v. 6, p. 138-147.

ONS (2022). **Nível dos reservatórios**. Operador Nacional do Sistema Elétrico. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/reservatorios>>. Acesso em: 17 de março de 2022.

OSTROUMOV, N., GORDON, J. M., FEUERMAN, D. (2009) **Panorama of dual-mirror aplanats for maximum concentration**. Appl. Opt., v. 48, n. 26, p. 4926–4931.

PANTHER (2005). **Aberração óptica de uma lente: coma**. Retirado do Wikimedia Commons, repositório de mídia gratuito, sob a licença CC BY-SA 3.0. Disponível em: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lens-coma\\_pt.svg#/media/File:Lens-coma\\_pt.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lens-coma_pt.svg#/media/File:Lens-coma_pt.svg)>. Acesso em: 20/05/2022.

P&D ANEEL (2021). **Desenvolvimento de tecnologia nacional de geração heliotérmica de energia elétrica**. Relatório final, p. 282.

PEDROSA-FILHO, M. H. O., FRAIDENRAICH, N., VILELA, O. C. (2013). **Parâmetros característicos de sistemas concentradores solares com absorvedores planos submetidos a desvios ópticos**. Revista Brasileira de Energia Solar, v. 4, n. 2, p. 101-108.

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., GONÇALVES, A. R., COSTA, R. S., LIMA, F. L., RÜTHER, R., ABREU, S. L., TIEPOLO, G. M., PEREIRA, S. V., SOUZA, J. G. (2017). **Atlas brasileiro de energia solar**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2. ed, p. 80.

PRASAD, G.S.C., REDDY, K.S., SUNDARARAJAN, T. (2017). **Optimization of solar linear Fresnel reflector system with secondary concentrator for uniform flux distribution over absorber tube**. Solar Energy, Elsevier, v. 150, p. 1-12.

PULIDO-IPARRAGUIRRE, D., VALENZUELA, L., FERNÁNDEZ-RECHE, J., GALINDO, J., Rodríguez, J. (2019). **Design, manufacturing and characterization of linear Fresnel reflector's facets**. Energies, v. 12, 2795.

PULIDO-IPARRAGUIRRE, D., VALENZUELA, L., SERRANO-AGUILERA, J. J., FERNÁNDEZ-GARCÍA, A. (2019). **Optimized design of a Linear Fresnel reflector for solar process heat applications**. Renew. Energy, v. 131, p. 1089–1106.

QIU, Y., LI, M. J., WANG, K., LIU, Z., XUE, X. D. (2017). **Aiming strategy optimization for uniform flux distribution in the receiver of a linear Fresnel solar reflector using a multi-objective genetic algorithm**. Applied Energy, Elsevier, v. 205, p. 1394–1407.

RABL, A. (1985). **Active Solar Collectors and Their Applications**. Oxford University Press, p. 517.

REN21 (2021). **Renewables 2021 Global Status Report**. REN21 – Renewables Now. Disponível em: < [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf) >. Acesso em: 16 de março de 2022.

SANTOS, A. V., CANAVARRO, D., HORTA, P., COLLARES-PEREIRA, M. (2021). **An analytical method for the optical analysis of Linear Fresnel Reflectors with a flat receiver**. Sol. Energy, 227, 203-216.

SCHLECHT, M., MEYER, R. (2012). **Site selection and feasibility analysis for concentrating solar power (CSP) systems**. Concentrating solar power technology, Cambridge, United Kingdom, Woodhead Publishing, p. 91-119.

SECUNDES, U. U., VILELA, O. C., FRAIDENRAICH, N., BARBOSA, E. M. S. (2018). **Utilização de sais fundidos na geração solar heliotérmica**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, 17 a 20 de abril, 2018.

SHARMA, V., NAYAK, J. K., KEDARE, S. B. (2015). **Comparison of line focusing solar CONCENTRATOR FIELDS CONSIDERING SHADING AND BLOCKING**. SOL. ENERGY, ELSEVIER, V. 122, P. 924-939.

SOUZA, L. E. V., CAVALTANTI, A. M. G. (2017). **Concentrated Solar Power deployment in emerging economies: The cases of China and Brazil**. *Ren. Sus. Eng. Rev.*, Elsevier, v. 72, p. 1094-1103.

SOUZA, L. F. L., FRAIDENRAICH, N., TIBA, C., GORDON, J. M. (2021). **Linear aplanatic Fresnel reflector for practical high-performance solar concentration**. *Solar Energy*, Elsevier, v. 222, p. 259-268.

SOUZA, L. F. L., PAES, M. D. A., TIBA, C. (2021). **Análise financeira da produção combinada de Eletricidade e calor de processo industrial com Energia solar**. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 12, n. 1, p. 87– 96.

VOUROS, A., MATHIOULAKIS, E., PAPANICOLAOU, E., VASSILIS-BELESSIOTIS, V. (2019). **On the optimal shape of secondary reflectors for linear Fresnel Collectors**. *Renewable Energy*.

WANG, Z. (2019). **Design of Solar Thermal Power Plants**. Academic Press, cap. 1, pp. 1-46.

WENDELIN, T. (2003). **SolTRACE: A new optical modeling tool for concentrating solar optics**, in: *Solar Energy*, ASMEDC, pp. 253-260.

WIKIMEDIA (2022). **Coma de uma única lente**. Retirado do Wikimedia Commons, repositório de mídia gratuito, sob a licença CC BY-SA 3.0. Disponível em: < <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/31/Lens-coma.svg> >. Acesso em: 25/03/2022.

WINSTON, R., GORDON, J. M. (2005) **Planar concentrators near the étendue limit**. *Opt. Lett.*, v. 30, n. 19, p. 2617–2619.

WINSTON, R., MIÑANO, J. C., BENÍTEZ, P. (2005). **Nonimaging Optics**. Elsevier, p. 512.

YANG, M., ZHU, Y., TAYLOR, R. A. (2018). **End losses minimization of linear Fresnel reflectors with a simple, two-axis mechanical tracking system**. *Energy Convers. Manage.*, v. 161 p. 284–293.

ZHU, G. (2013). **Development of an analytical optical method for linear Fresnel collectors**. *Sol. Energy*, Elsevier, v. 94, p. 240-252.

ZHU, G. (2017). **New adaptive method to optimize the secondary reflector of linear Fresnel collectors**. *Solar Energy*.

ZHU, G., LEWANDOWSKI, A. (2012). **A new optical evaluation approach for parabolic trough collectors: first-principle OPTical intercept calculation (FirstOPTIC)**. *J. Sol. Energy Eng.*, ASME, v. 134.

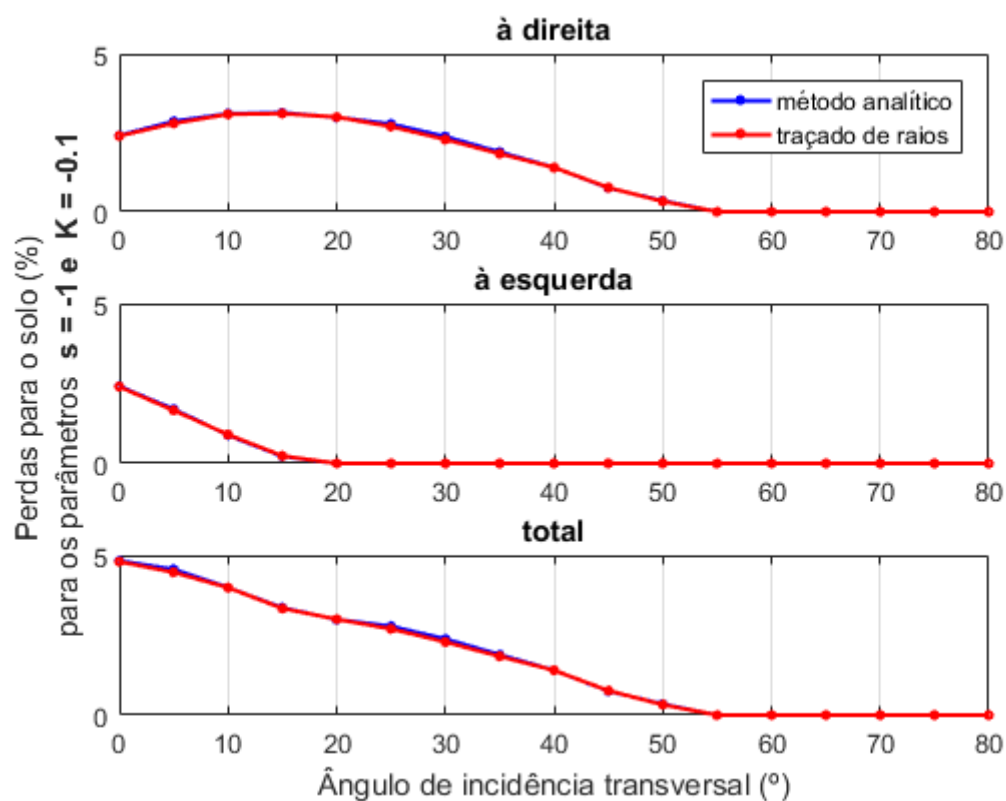
ZHU, G., WENDELIN, T., WAGNER, M. J., KUTSCHER, C. (2014). **History, current state, and future of linear Fresnel concentrating solar collectors**. *Sol. Energy*, Elsevier, v. 103, p. 639-652.

ZHU, J., HUANG, H. (2014). **Design and thermal performances of Semi-Parabolic Linear Fresnel Reflector solar concentration collector**. Energy Convers. Manage., v. 77, p. 733–737.

ZHU, Y, SHI, J., LI, Y., L. WANG, L., HUANG, Q., XU, G. (2017). **Design and thermal performances of a scalable linear Fresnel reflector solar system**. Energy Convers. Manage., v. 146, p. 174–181.

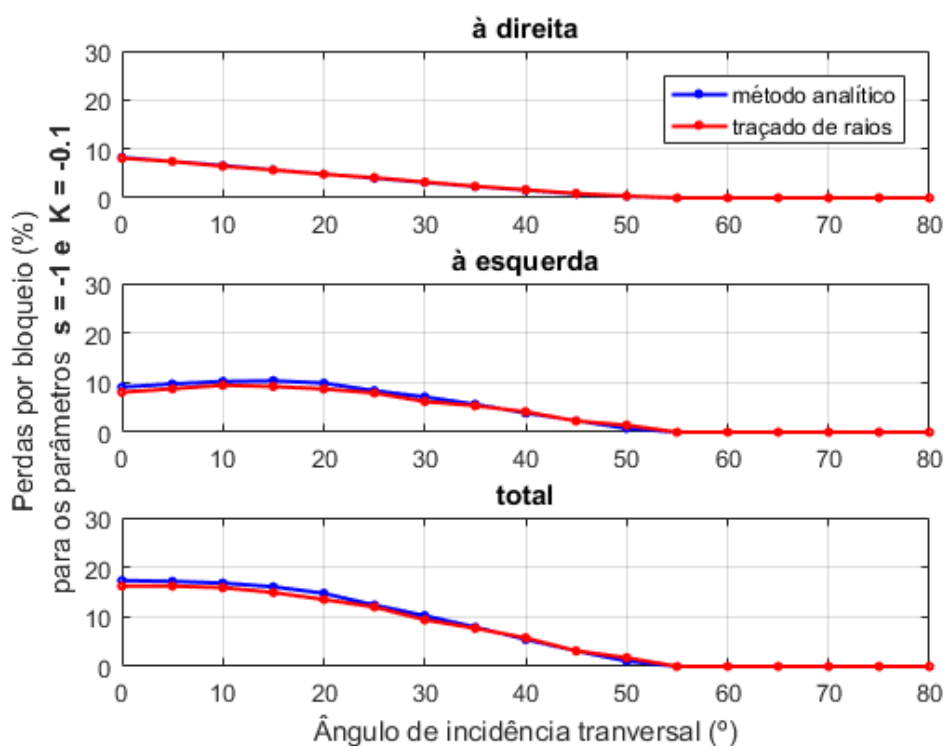
**APÊNDICE A - RESULTADOS DAS PERDAS INDIVIDUAIS PARA O CLFA COM  
PARÂMETROS  $S = -1$ ,  $K = -0,1$  E  $C = 50$**

Figura 46 – Perdas para o solo em função da variação transversal do ângulo de incidência para CLFA  $\{-1; -0,1\}$ .



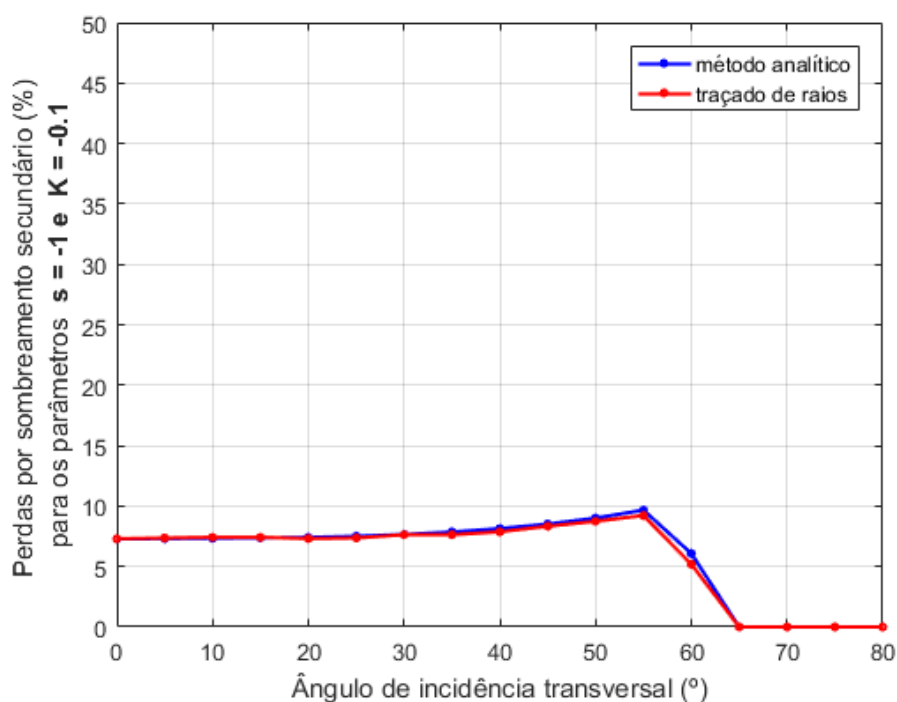
Fonte: O autor (2022).

Figura 47 – Perdas por bloqueio em função da variação transversal do ângulo de incidência para CLFA  $\{-1; -0,1\}$ . Primeira plotagem, que representa as perdas à direita do concentrador, apresenta pouca discordância entre o método analítico e o traçado de raios.



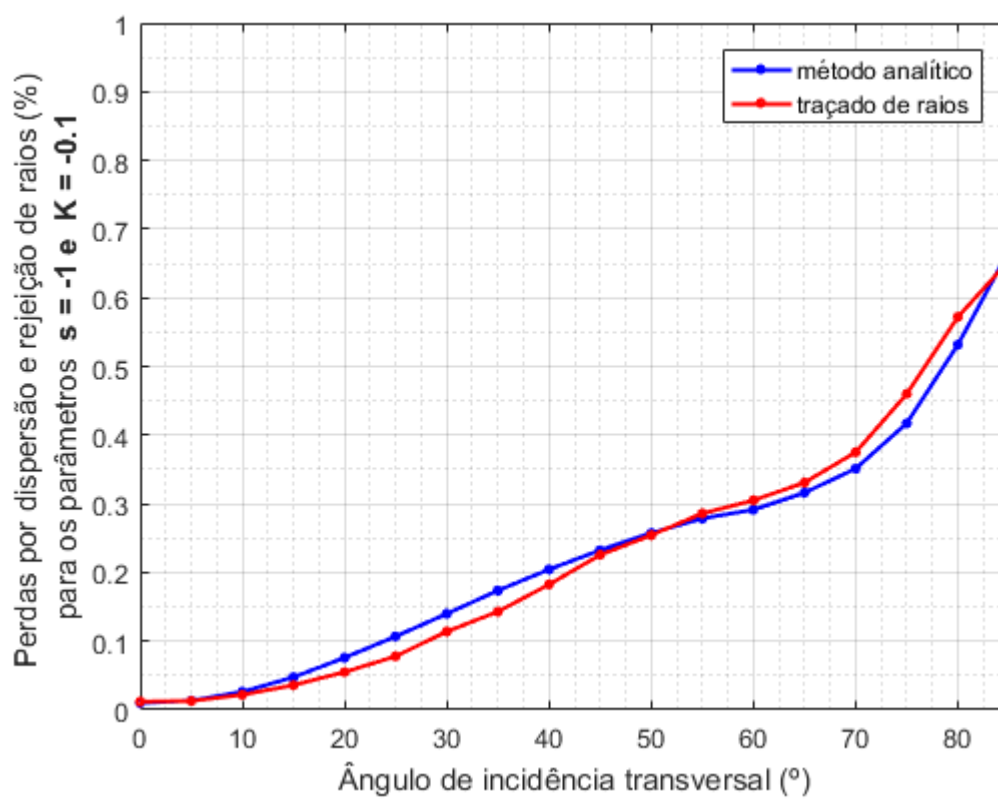
Fonte: O autor (2022).

Figura 48 – Perdas por sombreamento secundário em função da variação da projeção transversal do ângulo de incidência para CLFA  $\{-1; -0,1\}$ .



Fonte: O autor (2022).

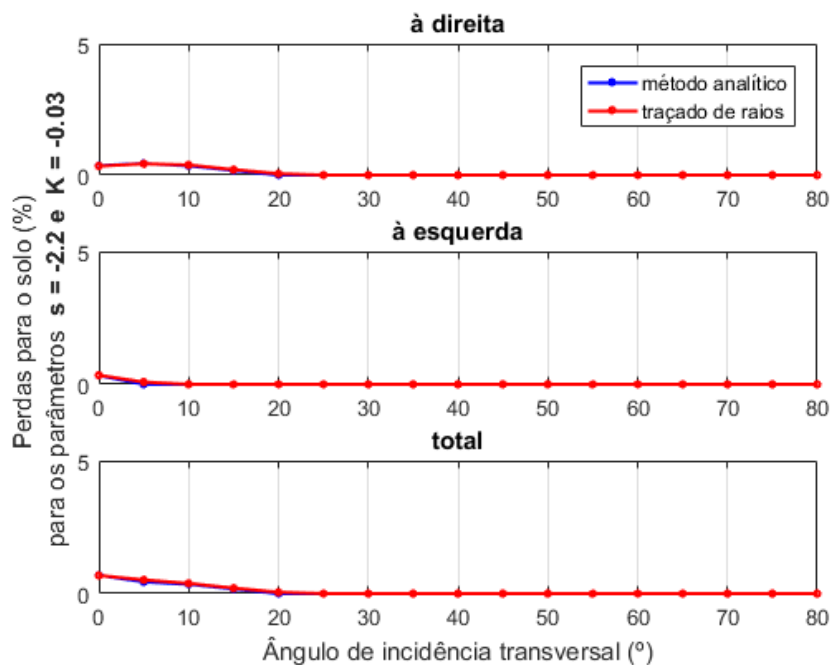
Figura 49 – Perdas por rejeição de raios e dispersão em função da variação da projeção transversal do ângulo de incidência para CLFA  $\{-1; -0,1\}$ .



Fonte: O autor (2022).

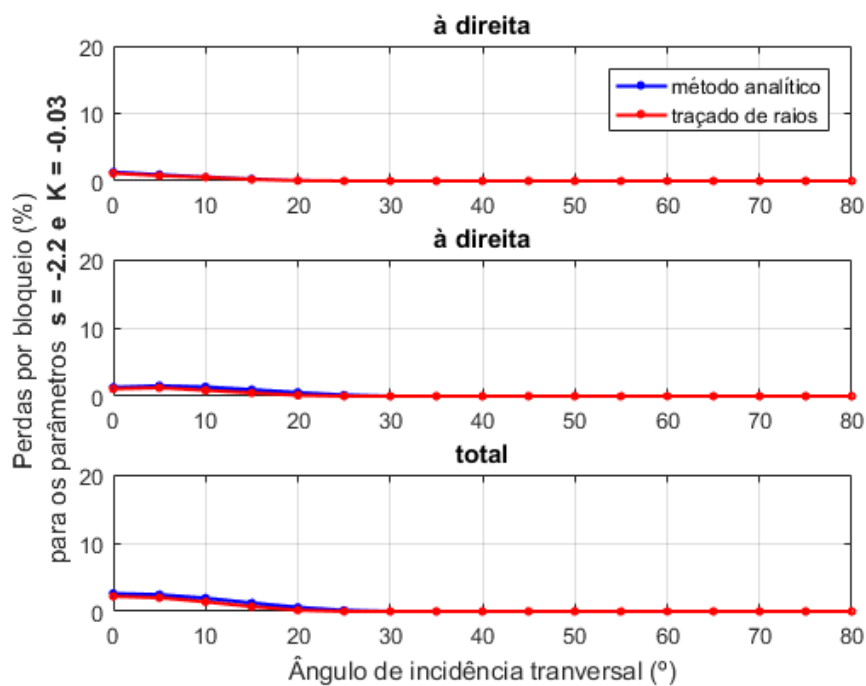
## APÊNDICE B - RESULTADOS DAS PERDAS INDIVIDUAIS PARA O CLFA COM PARÂMETROS $S = -2,2$ , $K = -0,03$ E $C = 35$

Figura 50 – Perdas para o solo em função da variação da projeção transversal do ângulo de incidência para CLFA  $\{-2,2; -0,03\}$ .



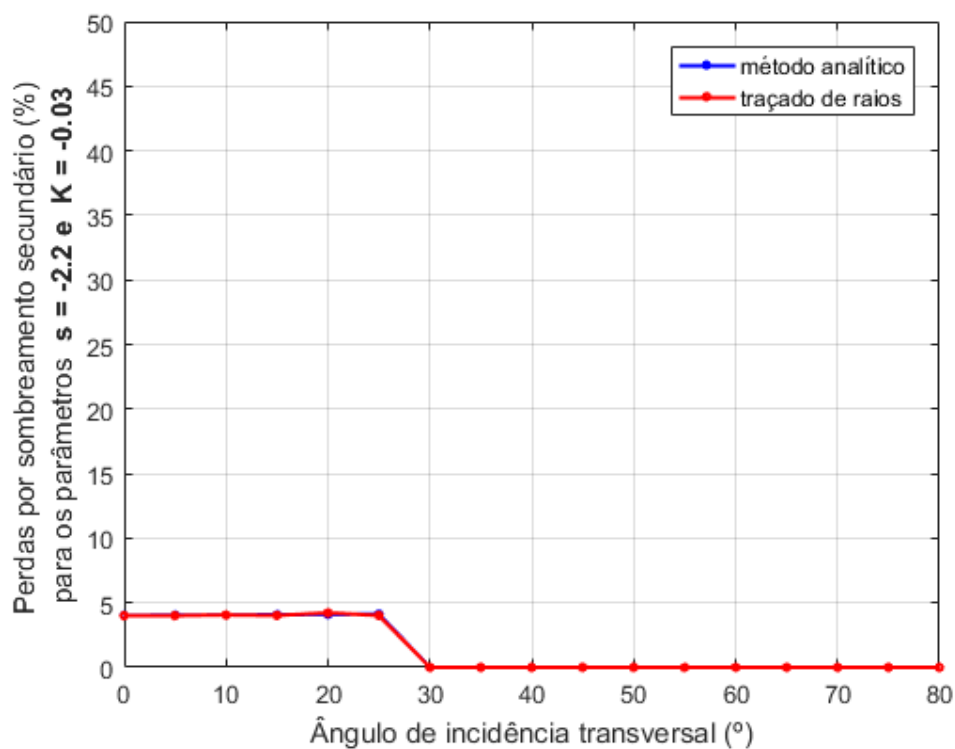
Fonte: O autor (2022).

Figura 51 – Perdas por bloqueio em função da variação da projeção transversal do ângulo de incidência para CLFA  $\{-2,2; -0,03\}$ .



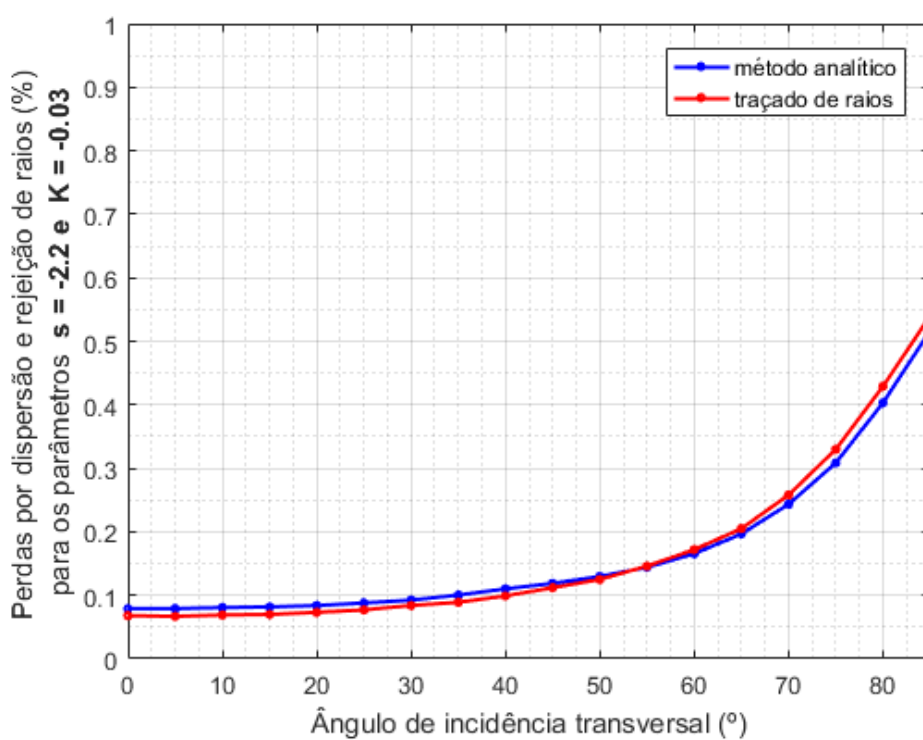
Fonte: O autor (2022).

Figura 52 – Perdas por sombreamento secundário em função da variação da projeção transversal do ângulo de incidência para CLFA  $\{-2,2; -0,03\}$ .



Fonte: O autor (2022).

Figura 53 – Perdas por rejeição de raios e dispersão em função da variação da projeção transversal do ângulo de incidência para CLFA  $\{-2,2; -0,03\}$ .



Fonte: O autor (2022).