



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E
NUCLEARES

EMERSON TORRES AGUIAR GOMES

**MODELO E DESEMPENHO DE CONCENTRADOR SOLAR APLANÁTICO COM
ABSORVEDOR CILÍNDRICO – APLICAÇÃO EM SISTEMAS SOLARES
TÉRMICOS**

Recife

2019

EMERSON TORRES AGUIAR GOMES

**MODELO E DESEMPENHO DE CONCENTRADOR SOLAR APLANÁTICO COM
ABSORVEDOR CILÍNDRICO – APLICAÇÃO EM SISTEMAS SOLARES
TÉRMICOS**

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

Área de Concentração: Fontes Renováveis de Energia.

Orientador: Prof^o. Dr. Naum Fraidenraich

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Olga de Castro Vilela

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

G633m Gomes, Emerson Torres Aguiar.
 Modelo e desempenho de concentrador solar aplanático com
 absorvedor cilíndrico – aplicação em sistemas solares térmicos. /
 Emerson Torres Aguiar Gomes. - Recife, 2019.
 109 f. : il., figs., gráfs., tabs.

 Orientador: Prof. Dr. Naum Fraidenraich.
 Coorientadora: Prof. Dra. Olga de Castro Vilela.

 Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
 Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e
 Nucleares, 2019.
 Inclui referências, apêndice e anexo.

 1. Engenharia de energia. 2. Concentrador solar. 3. Aplanático.
 4. Dupla reflexão. 5. Fator de interceptação. I. Fraidenraich, Naum,
 orientador. II. Vilela, Olga de Castro, coorientadora. III. Título.

CDD 621.042 (22. ed.)

UFPE
BDEN/2019-08

EMERSON TORRES AGUIAR GOMES

**MODELO E DESEMPENHO DE CONCENTRADOR SOLAR APLANÁTICO COM
ABSORVEDOR CILÍNDRICO – APLICAÇÃO EM SISTEMAS SOLARES
TÉRMICOS**

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

Aprovada em 05/04/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. Naum Fraidenraich (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Fernando Roberto de Andrade Lima (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Carlos Antônio Alves de Oliveira (Examinador Externo)
Instituto Federal de Educação de Alagoas

Prof^o. Dr. Luis Arturo Gómez Malagón (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

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

AGRADECIMENTOS

Ao professor Naum e à professora Olga pela dedicação, comprometimento, amizade e sobretudo pelo estímulo, carinho e compreensão ao longo desses anos de pesquisa.

À Universidade Federal de Pernambuco pela oportunidade de realizar pesquisa em uma instituição de tamanha envergadura.

Ao Programa de Tecnologias Energéticas e Nucleares por me ofertar a oportunidade de realizar o doutorado.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco por compreender a necessidade de dedicação à pesquisa e estimular a qualificação de seus docentes.

A cada um dos professores do CER: Chiguera Tiba, Elieuzza Moura, André Felipe e Alexandre Costa.

Aos professores do meu comitê de acompanhamento que estiveram presentes ao longo desses anos em várias etapas desse processo de pesquisa: Fernando de Andrade Lima, Manoel Henrique de Oliveira e Milton Rolim.

Aos colegas e amigos do grupo CER/PROTEN: Urbano, Tarcísio, Edson, Evelin, Kalydja, Nilvânia, Rinaldo e Marcelo, pelo apoio em diversos momentos, pela ajuda e amizade.

Ao amigo Carlos Oliveira por todo apoio ao longo da pesquisa.

A cada um dos meus familiares e amigos por me estimularem sempre.

Aos meus amados irmãos Édia, Edvânia, Edson Júnior e Elenice que foram, são e serão meus alicerces, juntos somos 5 estrelas.

À minha amada esposa Mariana por todo companheirismo, estímulo diário ao longo de cada dia de pesquisa, apoiando-me nas dificuldades e comemorando em cada vitória.

À minha amada filha Letícia por ser a minha fonte inesgotável de alegria e do mais puro e verdadeiro amor.

Ao meu pai Edson (in memoriam) e à minha mãe Helenice (in memoriam) por terem me dado a vida, uma linda família e por terem me ensinado o que há de mais importante: ética, respeito, amor, honestidade, retidão de caráter.

RESUMO

Concentradores usados em aplicações térmicas, como os cilindro-parábola, chegam a temperaturas de até 400°C a concentrações efetivas de 23 a 26 sóis. Este trabalho apresenta o aplanático como concentrador solar térmico de dupla reflexão com absorvedor cilíndrico, com concentração efetiva de 66 sóis para um fator de interceptação total (γ_T) de 0,72. Ao se adotar o fator de interceptação total de 0,98, similar ao do cilindro-parábola, obtém-se concentração efetiva de 36 sóis, o que representa uma concentração 50% maior que aquela apresentada pelo concentrador cilindro-parábola. Neste trabalho, são apresentadas duas metodologias distintas para o cálculo do fator de interceptação: a primeira metodologia, para uma reflexão no primário (γ_{1R}), baseia-se na razão entre cone de radiação solar e cone iluminado na região cilíndrica em torno do foco; a segunda metodologia, para o cálculo do fator de interceptação após a reflexão no secundário (γ_{2R}), relaciona a região iluminada após a segunda reflexão e o raio do absorvedor proposto para coleção da radiação. O fator de interceptação total, obtido pela soma dos dois fatores de interceptação. Os resultados obtidos são apresentados para as duas famílias de aplanáticos: tipo hiperbólico (parâmetros s e K positivos) e tipo elíptico (parâmetros s e K negativos), tendo o aplanático tipo elíptico apresentado melhor desempenho para concentração solar que o tipo hiperbólico. Ao final do trabalho, é feita uma comparação dos resultados obtidos de forma analítica com os resultados obtidos por software de simulação, cujos resultados mostraram-se bastante próximos, validando a metodologia analítica proposta.

Palavras-chave: Concentrador solar. Aplanático. Dupla reflexão. Fator de interceptação.

ABSTRACT

Concentrators used in thermal applications, such as cylindrical parabolic, reach temperatures up to 400°C at effective concentrations of 23 to 26 suns. This work presents the aplanatic as a double reflection thermal solar concentrator with cylindrical absorber, with effective concentration of 66 suns for a total intercept factor (γ_T) of 0.72. By adopting the total interception factor of 0.98, similar to the obtained in cylindrical parabolic, we obtain an effective concentration of 36 suns, which represents a concentration 50% higher than that presented by the cylindrical parabolic concentrator. In this work, two different methodologies are presented for the calculation of the interception factor: the first methodology, for the reflection in the primary (γ_{1R}), is based on the ratio between cone of solar radiation and cone illuminated in the cylindrical region around the focus; the second methodology, for the calculation of the intercept factor after reflection in the secondary (γ_{2R}), relates the illuminated region after the second reflection and the ray of the absorber proposed for the collection of the radiation. The total intercept factor is obtained by the sum of the two interception factors. The results obtained are presented for the two families of aplanatics: hyperbolic type (s and K parameters positive) and elliptical type (s and K parameters negative). The elliptical type aplanatic presented better performance for solar concentration than the hyperbolic type. At the end of the work, a comparison of the results obtained in an analytical way with the results obtained by simulation software, whose results were very close, validating the proposed analytical methodology.

Keywords: Solar concentrator. Aplanatic. Double reflection. Intercept factor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Concentrador Fresnel.....	21
Figura 2 –	Concentrador cilindro-parábola.....	22
Figura 3 –	Esquemático do concentrador cilindro-parábola.....	22
Figura 4 –	Aplanático	24
Figura 5 –	Aberração esférica.....	25
Figura 6 –	Coma	26
Figura 7 –	Ilustração do aplanático.....	27
Figura 8 –	Função de Aceitação Angular $F(\theta)$ em função do ângulo θ que atinge o concentrador.....	30
Figura 9 –	Distribuição de Brilho.....	31
Figura 10 –	Ângulo solar em função da distância.....	35
Figura 11 –	Esquemático geométrico de troca de radiação entre a fonte e o absorvedor.....	36
Figura 12 –	Concentrador cilindro-parábola com secundário.....	39
Figura 13 –	Concentrador do tipo SMS com dupla reflexão.....	40
Figura 14 –	Concentrador do tipo cauda.....	41
Figura 15 –	Aplanático proposto para concentração solar fotovoltaica.....	42
Figura 16 –	Concentrador aplanático com o feixe de radiação solar iluminando uma região cilíndrica de raio R_{il}	44
Figura 17 –	Aplanático e radiação solar iluminando uma região cilíndrica de raio R_{il}	50
Figura 18 –	Aplanático tipo hiperbólico.....	51
Figura 19 –	Aplanático tipo elíptico.....	52
Figura 20 –	Distribuição de feixes de raios que atingem o aplanático.....	54
Figura 21 –	Distribuição de raios para identificação dos ângulos de chegada no aplanático.....	56
Figura 22 –	Esquemático do aplanático com absorvedor cilíndrico de raio R_{abs}	58
Figura 23 –	Gráfico do raio da região iluminada R_{il} vs r_p para aplanático elíptico com parâmetros $s=-0,9$, $K=-0,1$ e $0,1 < NA < 1$ com θ_T variando entre 5 e 10 mrad.....	60

Figura 24 –	Gráfico do R_{il} vs r_p para aplanático hiperbólico com parâmetros $s=0,7$, $K=0,03$ e $0,25 < NA < 1$ com θ_T variando entre 5 e 10mrad...	61
Figura 25 –	Cone solar que atinge o absorvedor para a situação 1.....	64
Figura 26 –	Cone solar que atinge o absorvedor para a situação 2.....	66
Figura 27 –	Cone solar que atinge o absorvedor para a situação 3.....	67
Figura 28 –	Cone solar que atinge o absorvedor para a situação 4.....	68
Figura 29 –	Gráfico do raio da região iluminada (R_{il}) versus r_p para aplanático hiperbólico de parâmetros $s=0,75$, $K=0,03$ e $NA=1$ com θ_T variando de 5mrad a 10mrad.....	71
Figura 30 –	Região de perdas para diferentes raios de absorvedor e cones de radiação.....	72
Figura 31 –	Gráfico de $F(\theta_T)$ para um aplanático hiperbólico de parâmetros $s=0,75$, $K=0,03$, $NA=0,94$ $0,003m < R_{abs} < 0,006m$ vs θ_T (mrad)....	73
Figura 32 –	Gráfico $B_{eff}(\theta)$ vs θ	75
Figura 33 –	Aplanático tipo elíptico parâmetros $s=-0,9$, $K=-0,1$ e com $NA=0,9641$ e $R_{abs_min}=2,865mm$	81
Figura 34 –	$F(\theta)$ vs θ para aplanático elíptico $s=-0,9$, $K=-0,1$ e $NA=0,9641$...	82
Figura 35 –	Gráfico da concentração efetiva vs raio do absorvedor para aplanático $s=-0,9$, $K=-0,1$ e $\phi_{max}=0,9641$, $\theta_T=9mrad$	83
Figura 36 –	Gráfico do fator de interceptação vs raio do absorvedor para aplanático elíptico.....	83
Figura 37 –	Gráfico do fator de interceptação total vs a concentração efetiva para o aplanático elíptico.....	84
Figura 38 –	Aplanático hiperbólico parâmetros $s=0,75$, $K=0,03$ e com $NA=0,9552$ e $R_{abs_min}=2,865mm$, $\theta_T=9mrad$	86
Figura 39 –	$F(\theta)$ vs θ para aplanático $s=0,75$, $K=0,03$ e $NA=0,9552$	87
Figura 40 –	Gráfico da concentração efetiva vs raio do absorvedor para aplanático $s=0,75$, $K=0,03$ e com $NA=0,9552$, $\theta_T=9mrad$	88
Figura 41 –	Gráfico do fator de interceptação total vs raio do absorvedor para aplanático hiperbólico.....	89
Figura 42 –	Gráfico fator de interceptação total vs concentração efetiva para aplanático hiperbólico.....	90

Figura 43 –	Distribuição de radiação solar adotada para cálculo do fator de interceptação por meio de programa traçador de raios.....	91
Figura 44 –	Distribuição de raios simulados no Soltrace do aplanático elíptico $s=-0,9$, $K=-0,1$ e $NA=0,9641$, $\theta_T=9\text{mrad}$, $R_{\text{abs}}=0,003\text{m}...$	92
Figura 45 –	Fator de interceptação do aplanático elíptico $s=-0,9$, $K=-0,1$ e $NA=0,9641$, $\theta_T=9\text{mrad}.....$	94
Figura 46 –	Concentração efetiva para aplanático elíptico – resultados obtidos de forma analítica e simulada com traçador de raios.....	95
Figura 47 –	Distribuição de raios obtidos por meio do traçador de raios para o aplanático hiperbólico $s=0,75$, $K=0,03$, $NA=0,9552$, $R_{\text{abs}}=0,003\text{m}.....$	96
Figura 48 –	Fator de interceptação do aplanático hiperbólico $\theta_T=9\text{mrad}$, $s=0,75$, $K=0,03$ e $NA=0,9552.....$	97
Figura 49 –	Concentração efetiva do aplanático hiperbólico de $\theta_T=9\text{mrad}$, $s=0,75$, $K=0,03$ e $NA=0,9552.....$	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Configuração de possíveis aplanáticos de acordo com os parâmetros s , K e posição do absorvedor... ..	43
Tabela 2 –	Relação de aplanáticos elípticos com melhor relação de concentração geométrica com e sem sombra para θ_T de 9mrad.....	78
Tabela 3 –	Relação de aplanáticos tipo hiperbólico com melhor relação de concentração geométrica com e sem sombra para θ_T de 9mrad.....	79
Tabela 4 –	Modelo Analítico para o aplanático elíptico $s=-0,9$, $K=-0,1$, $NA=0,9641$, $\theta_T=9\text{mrad}$	85
Tabela 5 –	Modelo Analítico para o aplanático hiperbólico $s=0,75$, $K=0,03$, $NA=0,9552$, $\theta_T=9\text{mrad}$	90
Tabela 6 –	Simulação do aplanático elíptico ($s=-0,9$, $K=-0,1$ e $NA=0,9641$) utilizando-se programa traçador de raios com $\theta_T=9\text{mrad}$	93
Tabela 7 –	Simulação do aplanático hiperbólico ($s=0,75$, $K=0,03$ e $NA=0,9552$) utilizando-se o traçador de raios com $\theta_T=9\text{mrad}$	96
Tabela 8 –	Simulação de dimensões do aplanático elíptico.....	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS ARÁBICAS

a	Raio do absorvedor concentrador cilindro-parábola (m)
A	Semiabertura do concentrador cilindro-parábola (m)
abs	Dimensão linear do absorvedor (m)
ap	Área da superfície do absorvedor (m^2)
A_{ab}	Dimensão linear do coletor (m)
A_{ap}	Área da superfície do sol (m^2)
A_s	Coordenador, coordenação
$B(\theta)$	Distribuição de brilho solar (W/m^2 -sterad)
$B_{eff}(\theta)$	Brilho efetivo do sol (W/m^2 -sterad)
$B_{fonte}(\theta)$	Brilho da fonte (W/m^2 -sterad)
$C_{cilindro-parábola}$	Concentração do concentrador cilindro-parábola (sóis)
C_{cs}	Concentração geométrica considerando a sombra (sóis)
C_{eff}	Concentração efetiva (sóis)
$C_{ideal2D}$	Concentração ideal em duas dimensões (sóis)
$C_{ideal3D}$	Concentração ideal em três dimensões (sóis)
$CI(\delta r_p)$	Cone de iluminação de radiação que chega ao absorvedor
$ds-T$	Distância do sol à terra (m)
f	Distância focal (m)
f'	Distância focal deslocada (m)
$F(\theta)$	Função de aceitação angular (adimensional)
I_b	Fluxo de radiação incidente no concentrador (W/m^2)
I_T	Fluxo de radiação solar incidente total (W/m^2)
K	Razão entre a distância do vértice do secundário ao foco do aplanático e a distância focal (adimensional)
NA	Abertura numérica (adimensional)
p	É o ponto em que o feixe de radiação solar toca o primário (r_p, x_p) (m,m)
$\ p\ $	É a distância do ponto em que (r_p, x_p) até o centro da origem de coordenadas
$Q_{Abs \rightarrow S}$	Irradiância que atinge o sol proveniente do absorvedor (W)
$Q_{S \rightarrow Abs}$	Irradiância que atinge o absorvedor proveniente do sol (W)

$Q_{S \rightarrow ap}$	Irradiância que atinge o coletor proveniente do sol (W)
r	Eixo transversal do sistema de coordenadas do aplanático (m)
R_{abs}	Raio do absorvedor (m)
R_{abs_min}	Raio do absorvedor mínimo para cumprimento do limite de concentração do aplanático (m)
$RI(\delta r_p)$	Cone de radiação solar que ilumina o primário do aplanático
r_p	Distância do ponto do primário ao eixo longitudinal do aplanático (m)
r_{pmax}	Ponto do primário do aplanático mais distante do eixo longitudinal onde a radiação solar toca
r_s	Distância do ponto do secundário ao eixo longitudinal do aplanático (m)
r_s'	Distância do ponto s' do secundário ao eixo longitudinal do aplanático (m)
r_{smax}	Ponto do secundário do aplanático mais distante do eixo longitudinal onde a radiação solar toca
r_{sol}	raio do sol (m)
s	Razão entre a distância do vértice do primário ao vértice do secundário do aplanático e a distância focal (adimensional)
s'	Ponto do secundário do aplanático de coordenadas (r_s', x_s') (m)
T_{Abs}	Temperatura do absorvedor (graus)
T_s	Temperatura do sol (graus)
x	Eixo longitudinal do sistema de coordenadas do aplanático (m)
x_p	Distância do ponto do primário ao eixo transversal do aplanático (m)
x_{po}	Coordenada axial do vértice do primário do aplanático (m)
x_s	Distância do ponto do secundário ao eixo transversal do aplanático (m)
x_s'	Distância do ponto s' do secundário ao eixo transversal do aplanático (m)
x_{so}	Coordenada axial do vértice do secundário do aplanático (m)

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS GREGAS

α_{ab}	Absortividade
$\alpha(\varphi)$	Ângulo de borda do aplanático (radianos)
β	Ângulo entre a normal, passando pelo ponto (r_p, x_p) e chegando ao foco na origem (radianos)
ϕ	Ângulo de borda cilindro-parábola (radianos)
γ_{AT2R}	Fator de interceptação para a reflexão no secundário considerando o absorvedor
γ_{1R}	Fator de interceptação para uma reflexão no primário (adimensional)
γ_{2R}	Fator de interceptação para a reflexão no secundário (adimensional)
γ_T	Fator de interceptação total, razão entre o fluxo de radiação que atinge o absorvedor e o fluxo de radiação que chega ao concentrador (adimensional)
η_0	Eficiência óptica (adimensional)
φ	Ângulo de aceitação da cavidade aplanática (radianos)
φ_{max}	Ângulo máximo de aceitação da cavidade aplanática (radianos)
θ_m	Intervalo angular mínimo em que a radiação solar é coletada pelo absorvedor (radianos)
θ_M	Intervalo angular máximo em que a radiação solar é coletada pelo absorvedor (radianos)
θ_s	Semiângulo solar (radianos)
$\theta_{\sigma_{sol,pontual}}$	Desvio angular do sol para geometria de foco pontual (radianos)
$\theta_{\sigma_{sol,linear}}$	Desvio angular do sol para geometria de foco linear (radianos)
$\theta_{\sigma_{sol}}$	Desvio padrão angular do sol (radianos)
$\theta_{\sigma_{\acute{o}ptico}}$	Desvio padrão angular dos erros ópticos (radianos)
θ_T	Desvio padrão angular dos erros totais (radianos)
ρ_c	Refletividade
τ	Transmissividade
ω	Ângulo formado pela tangente ao raio do absorvedor, o ponto (r_p, x_p) e o foco na origem (radianos)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	CONCEITOS PRELIMINARES.....	20
2.1	CONCENTRADORES DE FOCO LINEAR.....	20
2.1.1	Concentrador de Fresnel	20
2.1.2	Concentrador cilindro-parábola.....	21
2.2	GEOMETRIA APLANÁTICA.....	23
2.3	FUNÇÃO DE ACEITAÇÃO ANGULAR.....	29
2.4	BRILHO SOLAR.....	30
2.5	EFICIÊNCIA ÓPTICA.....	32
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35
3.1	PROPRIEDADES DOS CONCENTRADORES SOLARES TÉRMICOS.....	35
3.2	CONCENTRADORES SOLARES COM DUPLA REFLEXÃO.....	39
3.3	GEOMETRIA APLANÁTICA – O APLANÁTICO COMO CONCENTRADOR SOLAR.....	41
3.4	LIMITE DE CONCENTRAÇÃO DO APLANÁTICO.....	43
4	METODOLOGIA DO TRABALHO.....	46
4.1	PREMISSAS ADOTADAS NA METODOLOGIA.....	48
4.2	PROCEDIMENTO PARA ESCOLHA DO APLANÁTICO.....	49
4.3	DIMENSIONAMENTO DO RAIOS DO ABSORVEDOR.....	52
4.4	METODOLOGIA PARA CÁLCULO DO RAIOS DO ABSORVEDOR QUE SATISFAÇA O LIMITE DE CONCENTRAÇÃO DO APLANÁTICO.....	61
4.5	METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO EFETIVA DO APLANÁTICO.....	63
4.5.1	Metodologia para cálculo do fator de interceptação para uma reflexão no primário.....	63
4.5.2	Metodologia para cálculo do fator de interceptação após a reflexão no secundário do aplanático.....	69
5	RESULTADOS OBTIDOS.....	77

5.1	RESULTADOS DO APLANÁTICO POR MEIO DA METODOLOGIA ANALÍTICA.....	77
5.1.1	Aplanáticos mais adequados considerando $(\alpha(\varphi))$ ângulo de borda.....	77
5.1.1.1	Aplanáticos Elípticos ($s < 0$ e $K < 0$).....	78
5.1.1.2	Aplanáticos Hiperbólicos ($s > 0$ e $K > 0$).....	79
5.1.2	Aplanático Elíptico: raio mínimo, função aceitação, fator de interceptação e concentração efetiva.....	80
5.1.3	Aplanático Hiperbólico: raio mínimo, função aceitação, fator de interceptação e concentração efetiva.....	86
5.2	RESULTADOS DO APLANÁTICO POR MEIO DE SIMULAÇÃO COM TRAÇAMENTO DE RAIOS.....	91
5.2.1	Simulação Aplanático Elíptico.....	91
5.2.2	Simulação Aplanático Hiperbólico.....	95
5.2.3	Estimativas de dimensões de um concentrador aplanático elíptico.....	98
6	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS.....	100
	REFERÊNCIAS.....	102
	APÊNDICE A – FLUXOGRAMAS DO PROGRAMA DO APLANÁTICO.....	106
	ANEXO A – DISTRIBUIÇÃO PADRÃO PARA O BRILHO SOLAR.....	108

1 INTRODUÇÃO

Diante da finitude e da, já atual, escassez de combustíveis fósseis, somada à crescente demanda por recursos energéticos, a geração de energia a partir de fontes não combustíveis é o caminho por onde devem ser direcionadas as pesquisas e os esforços da comunidade acadêmica.

O Brasil, mais especificamente a Região Nordeste, por ter uma localização próxima à linha do equador, apresenta características extremamente favoráveis ao uso da radiação solar como fonte de energia. O uso de fontes alternativas de energia é fundamental para o país, que tem em sua matriz elétrica cerca de 65% proveniente de hidrelétricas (EPE, 2018) e consequentemente, dependente do regime de chuvas. Para que não haja dependência majoritária de uma fonte de energia, é importante a diversificação da matriz elétrica, assim, a energia solar apresenta-se como uma alternativa viável e renovável para suportar o crescimento do país e a constante e crescente demanda por energia elétrica.

Dentre as formas de utilização de energia solar, existem a geração de energia elétrica a partir da conversão fotovoltaica e a partir da conversão termoelétrica. Ambas as tecnologias têm apresentado crescimento e contudo um dos fatores que as diferencia é a forma de armazenamento da energia por elas gerada. A geração fotovoltaica, em uma de suas aplicações, tem sua energia armazenada em bancos de baterias, que além de seu elevado custo, apresenta o problema de descarte desses acumuladores de carga. Já a concentração solar térmica, que gera energia elétrica por meio de conversão do calor em energia mecânica e em seguida em energia elétrica, armazena a energia em forma de calor. O armazenamento em forma de calor além de não gerar resíduo com descarte de baterias, apresentava em 2014 um custo da ordem de 15 dólares por kWh térmico armazenado (ZHU *et al.*, 2014), enquanto que o armazenamento em baterias custava cerca de 215 dólares por kWh armazenado em 2013 (MCKENNA *et al.*, 2013). Esta diferença de custo de armazenamento ressalta a importância da concentração solar térmica de forma complementar à geração fotovoltaica. Ambas as tecnologias são complementares e não concorrentes, pois o custo do armazenamento térmico é inferior ao fotovoltaico, viabilizando a utilização da energia, termicamente armazenada, em horários já sem a presença do sol, desde que as temperaturas alcançadas pelos concentradores sejam elevadas para uma maior eficiência na conversão termoelétrica.

Por meio da concentração solar, busca-se aumentar a densidade de fluxo de radiação solar (concentração de fluxo) na região do absorvedor. Esse aumento da densidade do fluxo de radiação solar ocorre direcionando a radiação solar incidente na região da abertura do sistema

para outra região de dimensões menores. Existem várias formas de realizar concentração solar térmica. Há estruturas já comercialmente disponíveis que concentram o fluxo de radiação solar em tubos absorvedores lineares, dentre as quais podem-se destacar as mais utilizadas: concentrador Fresnel e concentrador cilindro-parábola.

Quando se trata de concentração solar térmica, independentemente da estrutura proposta, busca-se elevar temperatura do fluido que circula nos tubos absorvedores para assim, reduzir as perdas térmicas, melhorando a eficiência na conversão termoelétrica. Uma das formas de se elevar a temperatura do fluido é maximizando o produto da concentração geométrica e a eficiência óptica do sistema, tendo-se assim o conceito de concentração efetiva ou de fluxo. Os sistemas concentradores de fluxo solar têm sido utilizados com o objetivo de permitir que sejam atingidas altas temperaturas para geração de vapor em sistemas concentradores de radiação, com o propósito de converter energia térmica em elétrica com elevada eficiência.

A literatura científica já apresenta concentradores que elevam a temperatura de trabalho do fluido térmico, sendo esse um tema atual. A busca por esse aumento de concentração envolve dispositivos com dupla reflexão, como cilindro-parábola com secundário (RODRIGUEZ-SANCHEZ; ROSENGARTEN, 2015) e concentradores de óptica ideal como aqueles construídos pelo método SMS (simultaneous multiple surface) (CANAVARRO *et al.*, 2013). Deve-se notar que dispositivos de dupla reflexão que utilizam óptica ideal são não formadores de imagens (MIÑANO *et al.*, 2009). Como uma variação às estruturas parabólicas e de ótica ideal, foi proposta a utilização de dispositivos formadores de imagens, apresentando geometria aplanática para concentração solar (GORDON, 2010).

A justificativa para a elaboração deste trabalho se dá pela necessidade de se propor uma nova configuração de concentrador solar térmico com foco linear e absorvedor cilíndrico de alta concentração com compactidade. Tendo em vista que já existem desenvolvidos concentradores anidólicos, ou não formadores de imagens, que apresentam elevada concentração, mas que não formam imagens e apresentam estrutura com grandes dimensões, esta pesquisa se apoia em concentradores de geometria aplanática como sendo uma alternativa para concentração térmica por apresentarem estrutura mais compacta e que podem vir a ser de mais fácil implementação.

Buscando uma melhor eficiência na conversão termoelétrica, alcançada com temperaturas mais altas (BEHAR, 2018), o trabalho apresenta alternativas para maximizar o produto da concentração geométrica pela eficiência óptica, denominado de concentração efetiva ou concentração de fluxo.

Um dos fatores fundamentais para maximizar a concentração efetiva que atinge o absorvedor é o correto dimensionamento do absorvedor, o qual deve ser de tal forma que aproveite a maior parte da radiação incidente, aumentando o fator de interceptação, sem aumentar excessivamente as perdas térmicas (PEDROSA FILHO, 2013).

O aumento da concentração solar visa aumentar a temperatura do fluido pelo aumento da irradiância no absorvedor, contudo a concentração geométrica tem um limite máximo. A eficiência óptica mede a fração da radiação, em potência, que entra na abertura e atinge o absorvedor. Assim, é mister buscar um concentrador solar que possa fornecer elevadas concentrações efetivas e que viabilize escolhas entre a relação normalmente dicotômica entre eficiência óptica e concentração geométrica. Sistemas de concentração que minimizam perdas térmicas levam à redução das dimensões do absorvedor para que seja possível obter inicialmente maiores temperaturas, aumentando assim, a eficiência térmica na região de operação (ROLIM *et al.*, 2012). A redução das dimensões do absorvedor implica, via de regra, uma redução da eficiência óptica do sistema, visto que o fator de interceptação da radiação proveniente do sol e que alcança a região do absorvedor apresenta redução.

Este trabalho apresenta o concentrador aplanático, historicamente utilizado em telescópios, por ser um dispositivo formador de imagens, como uma alternativa para concentração solar térmica com dupla reflexão apresentando em seu foco absorvedor cilíndrico. Uma dupla de espelhos ou lentes é considerada de geometria aplanática quando ela elimina imperfeições na formação da imagem tais como aberração esférica e coma. Inicialmente, são apresentados os parâmetros s (distância entre os vértices do primário e secundário do aplanático), K (distância entre o vértice do secundário e o foco do aplanático), e NA (abertura numérica do concentrador) que definem unicamente o primário e o secundário do aplanático e suas diversas configurações, sendo umas mais adequadas para concentração solar e outras nem tanto (OSTROUMOV *et al.*, 2009). Em seguida, são analisadas as concentrações geométricas para absorvedores cilíndricos de diferentes raios, bem como suas respectivas eficiências ópticas, obtendo-se a concentração efetiva de forma analítica.

Baseado na variação dos parâmetros que definem o aplanático e levando-se em consideração a compacidade da estrutura, foram obtidas famílias de aplanáticos e suas concentrações geométricas analisadas. Foram apresentadas duas metodologias analíticas distintas para o dimensionamento do fator de interceptação para uma e duas reflexões dessas famílias de concentradores aplanáticos lineares com absorvedor cilíndrico. Definidas as dimensões do absorvedor a ser utilizado, são calculados fator de interceptação para o caso de uma reflexão (γ_{1R}) e duas reflexões (γ_{2R}), somando-se ambos para se obter o fator de

interceptação total (γ_T). O cálculo do fator de interceptação é necessário para o cálculo da concentração efetiva, visto que ele compõe a eficiência óptica (η_0), cujo produto pela concentração geométrica fornece a concentração efetiva do sistema.

Este trabalho de tese tem por objetivo propor e projetar concentradores térmicos de geometria aplanática, bem como propor um modelo analítico para dimensionamento da concentração efetiva em concentradores de dupla reflexão e comparar os resultados obtidos por meio do modelo proposto com simulações obtidas com traçadores de raios. Serão estudadas duas configurações de espelhos aplanáticos denominadas: tipo hiperbólica com parâmetros $s > 0$ e $K > 0$ e tipo elíptica com parâmetros $s < 0$ e $K < 0$.

Os objetivos específicos são os seguintes:

1. Apresentar o aplanático como um concentrador solar térmico de foco linear com os parâmetros que o definem, respeitando o limite de concentração do aplanático;
2. Analisar o comportamento dos concentradores aplanáticos mais adequados para concentração solar em função dos seguintes parâmetros: concentração obtida, abertura numérica, compacidade e raio do absorvedor;
3. Analisar os mecanismos de perda de concentração efetiva do concentrador aplanático como fator de interceptação e sombra do secundário sobre o primário, apresentando alternativas entre máxima eficiência óptica e máxima concentração efetiva;
4. Propor, desenvolver e apresentar modelo analítico de cálculo da concentração efetiva obtida pela estrutura, calculando o fator de interceptação para uma e duas reflexões;
5. Propor otimização do concentrador aplanático em função da área total ocupada pelo primário, concentração obtida, ângulo de borda, abertura numérica, altura do secundário e perdas.

2 CONCEITOS PRELIMINARES

Concentradores solares térmicos buscam elevar a temperatura de trabalho de fluidos térmicos por meio do aumento da concentração geométrica e da eficiência na coleta da radiação nos absorvedores. Nesse sentido, esse capítulo irá apresentar conceitos de concentradores solares térmicos de foco linear como o Fresnel e o cilindro-parábola, bem como a geometria aplanática e suas especificidades para melhor fundamentar a proposta do concentrador aplanático. Conceitos como função de aceitação angular, função de brilho, fator de interceptação serão apresentados por serem fundamentais no dimensionamento da eficiência óptica de concentradores térmicos. A concentração geométrica é definida como a razão entre a área de coleção da radiação e a área de absorção. A eficiência óptica é a razão entre os raios que atingem o absorvedor e aqueles que atingem o coletor de radiação, sendo menor ou idealmente igual a 1. Já a concentração de fluxo ou efetiva é fornecida pelo produto concentração geométrica pela eficiência óptica a ser descrita no decorrer deste capítulo.

2.1 CONCENTRADORES DE FOCO LINEAR

Nesta seção, serão apresentados os conceitos de fundamentação teórica dos concentradores de foco linear mais utilizados comercialmente: concentrador Fresnel e cilindro-parábola.

2.1.1 Concentrador de Fresnel

Uma das formas de se realizar a concentração solar térmica é por meio de concentradores de Fresnel constituídos por espelhos planos, ou de pequena curvatura (semiplanos), dispostos de forma a refletirem a luz proveniente do sol para a região de foco linear onde encontra-se o absorvedor, conforme ilustrado na Figura 1. Em um campo de refletores lineares de Fresnel, linhas de refletores direcionam radiação solar incidente para um receptor linear. Parte da área de abertura do refletor fica sombreada e parte bloqueada em função da proximidade das linhas de espelhos refletores vizinhos. Assim, a área de abertura completa dos refletores fica comprometida (SHARMA, 2014). A sombra em um Fresnel de um espelho vizinho a outro ocorre quando a radiação solar não chega a tocar no espelho vizinho. Já o bloqueio ocorre quando há reflexão no espelho do Fresnel, contudo a radiação não chega a atingir o absorvedor, tocando a parte posterior do espelho vizinho (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Figura 1 - Concentrador Fresnel



Fonte: (ZHU *et al.*, 2014)

Os refletores de Fresnel inclinam-se à medida em que o sol desloca-se ao longo do dia, de forma que a normal a cada espelho aponta para a bissetriz do ângulo formado pelo sol, espelho e absorvedor. Essa estrutura apresenta como pontos positivos: a praticidade e baixo custo de implementação por terem espelhos planos ou semiplanos localizados próximos ao solo e que acompanham o movimento do sol. Contudo, um Fresnel típico aquece fluido térmico a até 400°C (MUÑOZ *et al.*, 2015). Em busca de maiores concentrações, além da utilização de espelhos semiplanos do tipo Fresnel, foram utilizadas outras estruturas concentradoras com espelhos não planos, como é o caso do cilindro-parábola, bem como outras estruturas com dupla reflexão apresentadas ao longo deste capítulo.

2.1.2 Concentrador cilindro-parábola

Os concentradores do tipo cilindro-parábola são os concentradores térmicos mais comuns comercialmente. Os coletores parabólicos são revestidos por um material refletor e ao longo da linha de foco do refletor parabólico é colocado normalmente um tubo cilíndrico denominado absorvedor (BARANOV; MELNIKOV, 1966).

O concentrador típico do tipo cilindro-parábola (Figura 2) apresenta apenas uma reflexão no coletor cilíndrico e rastreia o Sol de tal sorte que os feixes de radiação incidem perpendicularmente à abertura da parábola coletora de radiação.

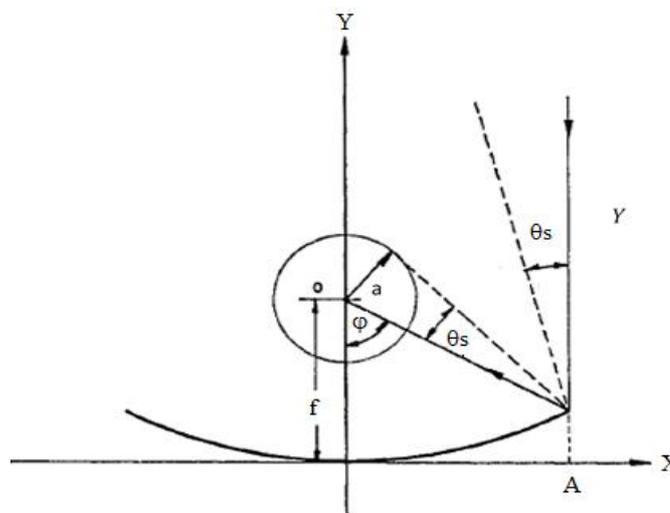
Figura 2 - Concentrador cilindro-parábola



Fonte: (RENEWABLE POWER NEWS, 2011)

Nesse concentrador cilindro-parábola, o espelho parabólico focaliza a radiação solar por meio de um feixe colimado direcionando-a para a região focal linear onde está localizado absorvedor cilíndrico (FRAIDENRAICH; LYRA, 1995). Na Figura 3, são apresentados o ângulo de borda do cilindro-parábola (φ), além do semiângulo do cone solar (θ_s).

Figura 3 - Esquemático do concentrador cilindro-parábola



Fonte: Adaptado (RABL, 1985)

A concentração do cilindro-parábola ($C_{\text{cilindro-parábola}}$) com coletores cilíndricos de abertura $2A$ e absorvedores de raio a , localizados na região focal é indicada pela Eq. 1.

$$C_{\text{cilindro-parábola}} = \frac{2A}{2\pi a} = \frac{\text{sen}(\varphi)}{\pi \text{sen}(\theta_s)} \quad (1)$$

Onde (2a) é o diâmetro do absorvedor, (2A) é a abertura do concentrador, (φ) é o ângulo de borda do cilindro parábola, e (θ_s) é o semiângulo de abertura do cone solar.

A concentração ideal em duas dimensões (C_{ideal2D}) equivale ao inverso do seno do semiângulo solar, conforme Eq. 2 (RABL, 1985).

$$C_{\text{ideal2D}} = \frac{1}{\text{sen}(\theta_s)} \quad (2)$$

Como pode ser observado na Eq. 3, a concentração máxima teórica do cilindro-parábola se verifica para o ângulo ($\varphi=90$ graus).

$$C_{\text{cilindro-parábola}} = \frac{\text{sen}(\varphi)}{\pi} \cdot C_{\text{ideal2D}} \quad (3)$$

Considerando ângulo de borda máximo ($\varphi=90$ graus) e um semiângulo solar, já contendo o desvio padrão do erros totais do semiângulo solar ($\theta_s=9\text{mrad}$), obtém-se uma concentração que idealmente é da ordem de 36 sóis. Contudo, verifica-se que os concentradores cilindro-parábola habitualmente utilizados chegam a valores de concentração efetiva (já considerando-se perdas ópticas e especulares e o ângulo de borda menor que 90 graus) da ordem de 23 sóis (BENDT *et al.*, 1979), enquanto os resultados apresentados pelo Fresnel são da ordem de 15 sóis (BETALGY *et al.*, 2015). Essa concentração 50% superior em relação ao Fresnel, leva à utilização maior da tecnologia de concentrador cilindro-parábola.

Concentradores com uma única superfície refletora, como os descritos acima, como também com duas superfícies refletoras têm sido utilizados na busca por aumentar a concentração, sendo propostas diversas estruturas que aumentem a concentração geométrica, sem elevar em demasia a dispersão dos feixes de radiação solar. Dentre as estruturas propostas, está o conjunto de espelhos ou lentes denominados aplanáticos, definidos na seção seguinte.

2.2 GEOMETRIA APLANÁTICA

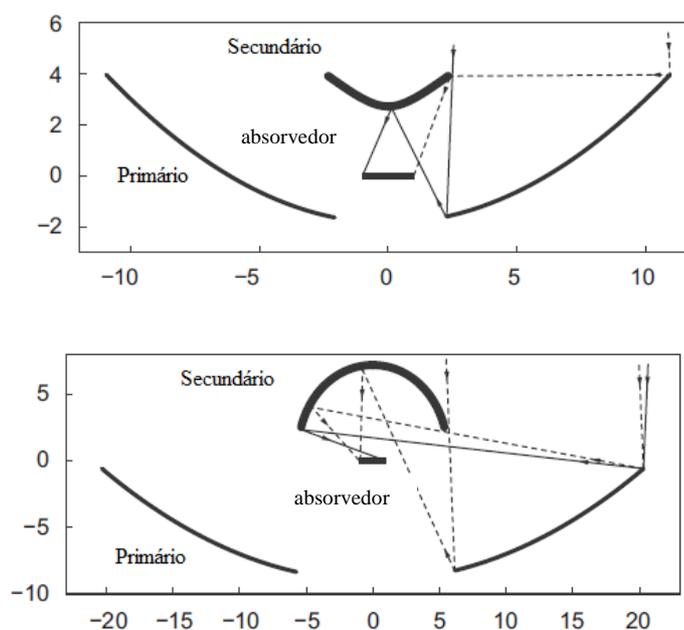
A geometria aplanática consiste na eliminação de efeitos que causam distorção na imagem como a aberração esférica e o coma. Os aplanáticos são sistemas ópticos formados por

uma dupla de lentes e/ou espelhos que não possuem aberração esférica, que é a variação da posição da imagem em relação à abertura, nem tampouco aberração por coma, variação da magnificação de acordo com a abertura (GORDON, 2010). O espelho aplanático é composto por um espelho primário e um espelho secundário, de forma que ao se eliminar as aberrações, é possível aumentar a concentração solar incidente sobre o absorvedor.

A utilização dos espelhos aplanáticos como concentradores solares teve início em 2002, com a solução analítica das equações que definem o aplanático publicada por Lynden-Bell (2002), até então esses espelhos eram utilizados apenas na astronomia, por meio de telescópios (HEAD, 1957). A solução analítica das equações que definem o aplanático baseia-se na definição de parâmetros s e K , que relacionam a posição dos vértices do primário e secundário.

A Figura 4 apresenta duas das possíveis configurações de aplanáticos para concentração solar. Pode-se observar a presença dos espelhos primário e secundário, de forma que um absorvedor plano está localizado no centro do eixo de coordenadas indicado na figura. Esta estrutura composta pelo primário e secundário realiza o rastreamento do sol ao longo do dia. É possível notar que ambas as estruturas têm secundários com formas distintas, isso deve-se à variação de valores dos parâmetros s e K que definem o aplanático.

Figura 4 – Aplanático

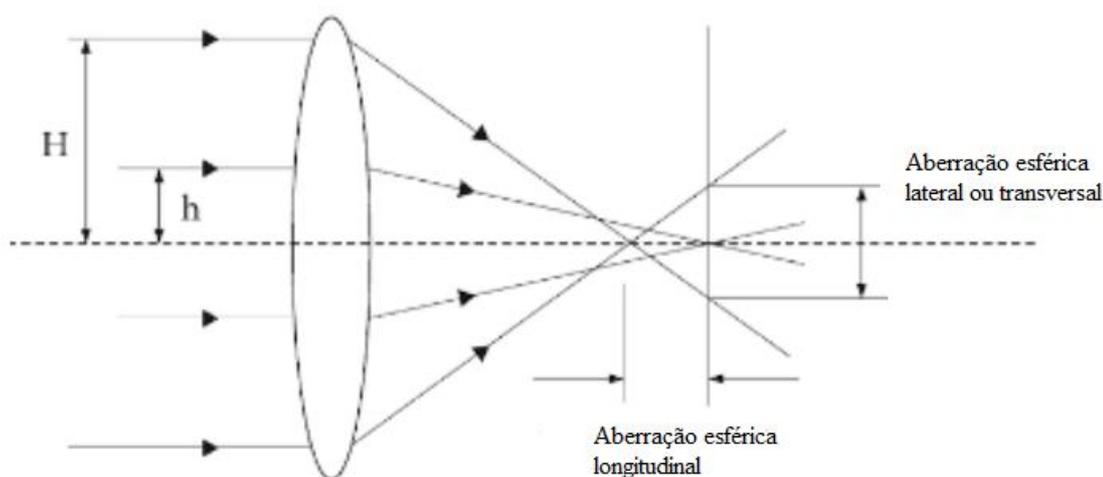


Fonte: Adaptado (GOLDSTEIN; GORDON, 2011)

A geometria aplanática trata-se de uma adaptação de duas superfícies ópticas denominadas primário e secundário, com graus de liberdade, podendo ser reflexivas e/ou refrativas.

O aplanático elimina a aberração esférica que é uma imperfeição da imagem devido à curvatura esférica da lente ou do espelho (MARSHALL *et al.*, 2015). De forma que quando um objeto está no infinito, a imagem deve se formar no foco. Entretanto, devido à aberração esférica, a distância focal é diferente para raios que atravessam a lente em diferentes distâncias do eixo óptico (COURROL; PRETO, 2011). Isso representa um empecilho para que os raios de um ponto-objeto converjam para um ponto-imagem depois de atravessar o sistema óptico. O efeito da aberração esférica é representado na Figura 5 por uma lente que gera imagem em uma região cuja posição não está disposta exatamente no eixo óptico longitudinal e transversal. Assim, nesse caso há aberração esférica longitudinal e transversal.

Figura 5 - Aberração esférica

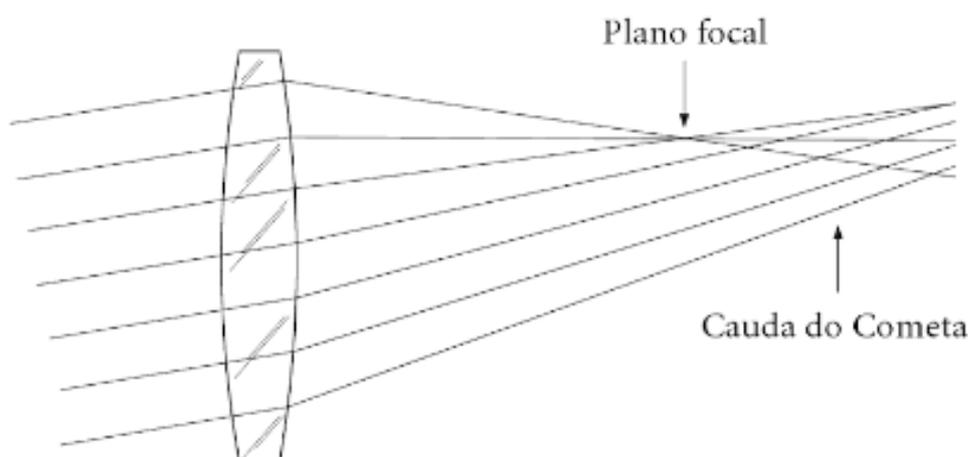


Fonte: (COURROL; PRETO, 2011)

Já o coma (Figura 6), também eliminado pelo aplanático, ocorre quando uma lente produz a imagem de um objeto fora do eixo óptico, à medida em que os raios passam através da região mais externa da lente ou do espelho, eles são focalizados em diferentes pontos (COURROL; PRETO, 2011). A imperfeição na formação de imagem denominada coma tem essa nomenclatura devido à forma de um cometa na imagem. Neste caso, a imagem de um ponto fora do eixo óptico aparece como um borrão de luz com a forma de um cometa. O coma reduz a possibilidade da lente ou espelho formar a imagem quando os feixes de luz incidem em suas bordas. Um espelho ou uma lente com coma considerável pode produzir uma imagem

nítida no campo central, mas que se torna bastante difusa. No que tange à energia solar por concentração, em um sistema óptico com coma, perde-se muita radiação nas bordas dos espelhos, reduzindo a radiação que atinge o absorvedor, tal efeito é indesejado. Podem-se obter lentes e/ou espelhos com aberração esférica e coma desprezíveis de acordo com a óptica de imagem composta por espelhos ou lentes denominadas aplanáticas (WINSTON, 1970).

Figura 6 - Coma



Fonte: (COURROL e PRETO, 2011)

O concentrador aplanático busca eliminar esses efeitos indesejáveis, aberração esférica e coma, considerados de ordem zero e primeira ordem do ponto de vista da óptica do concentrador, ao mesmo tempo em que procura aumentar, por meio de dupla reflexão, a concentração solar geométrica. A eliminação desses efeitos é de grande importância porque, caso que isso não aconteça, o feixe colimado que atinge a abertura do concentrador estaria formando uma mancha luminosa na região focal e não uma imagem pontual quase perfeita. Esse efeito se traduz em perdas ópticas e conseqüentemente menor concentração, impondo o uso de um absorvedor cilíndrico de maiores dimensões para absorção de toda a radiação, o que reduziria a concentração geométrica do conjunto óptico (FRAIDENRAICH; LYRA, 1995).

Para ser considerado de geometria aplanática, o sistema óptico deve necessariamente satisfazer o princípio de Fermat, a lei de Snell e a condição do seno de Abbe (LYNDEN-BELL, 2002):

- a) Princípio de Fermat – O princípio de Fermat estabelece para concentradores solares, com fonte essencialmente no infinito, que todos os raios da frente de onda devem atingir o absorvedor com distância total constante (GORDON, 1996). Mesmo com a trajetória

distinta percorrida por raios luminosos num mesmo índice de refração (n), o percurso total é constante, obedecendo a Eq. 4.

$$nL_0 + nL_1 + nL_2 = \text{constante} \quad (4)$$

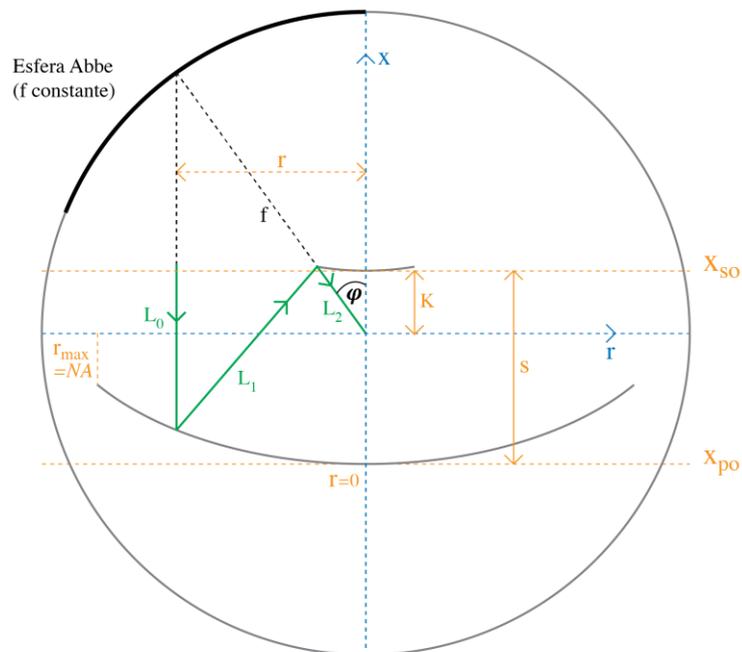
- b) Lei de Snell – A Lei de Snell relaciona o feixe de luz incidente em uma interface e a luz refletida ou refratada dessa interface, independentemente se há alteração ou não do índice de refração do meio. A Eq. 5 representa a expressão da Lei de Snell.

$$n_1 \text{sen}\theta_1 = n_2 \text{sen}\theta_2 \quad (5)$$

- c) Condição do seno de Abbe – Amplificação constante para todos os raios paraxiais. A partir da Figura 7, que representa um concentrador aplanático, a relação entre a distância do raio incidente ao eixo do sistema (r) e o seno do ângulo de saída do raio solar (φ) é constante e igual à distância focal efetiva (f) (LYNDEN-BELL, 2002), (Eq. 6).

$$f = \frac{r}{\text{sen}(\varphi)} = \text{constante} \quad (6)$$

Figura 7 - Ilustração do aplanático



Fonte: o autor

φ é o ângulo de saída da cavidade aplanática de qualquer raio que incide na abertura, conforme indicado na figura. Já o ângulo máximo ou de borda que corresponde ao raio que

incide no limite da abertura, esquerda ou direita, é representado por φ_{\max} , sendo o valor máximo desse ângulo φ , quando o feixe incide no primário com r_{pmax} .

O foco é escolhido no centro do sistema de coordenadas (0,0) e a escala é ajustada de acordo com o comprimento da distância focal efetiva (OSTROUMOV *et al.*, 2009). Considerando o parâmetro (f) unitário, a distância r , dos raios incidentes (verticais) ao eixo do concentrador satisfaz a relação dada pela Eq. 7.

$$r = \text{sen}\varphi \quad (7)$$

A abertura numérica (NA) do concentrador ocorre quando o ângulo de saída da cavidade aplanática é máximo, sendo fornecida pela Eq. 8.

$$NA = \text{sen}\varphi_{\max} \quad (8)$$

É importante ressaltar que quando o ângulo de saída da cavidade é máximo ($\varphi_{\max} \leq 90^\circ$), temos a abertura numérica ($NA \leq 1$). Como se pode observar, a dimensão máxima do primário do aplanático é igual à sua abertura numérica (NA) ao se considerar $f=1$, conforme indicado na Eq. 7.

Como pode ser observado na Figura 7, o parâmetro s representa a razão da separação dos vértices do primário e do secundário do aplanático pela distância focal efetiva (f), sendo adimensional e escrito conforme Eq. 9.

$$s = \frac{x_{po} - x_{so}}{f} \quad (9)$$

Onde x_{po} e x_{so} são as coordenadas axiais dos vértices do primário e secundário, respectivamente. O parâmetro K também é adimensional e, assim como o parâmetro s , é fundamental para a construção do aplanático, sendo a razão entre a distância entre o foco e o vértice do secundário e a distância focal efetiva (f) escrito conforme Eq. 10.

$$K = \frac{-x_{so}}{f} \quad (10)$$

A partir dos parâmetros adimensionais s e K , é possível definir o conjunto de pontos

pertencentes ao primário e ao secundário do aplanático, assim definindo univocamente as duas superfícies do aplanático, mediante o cumprimento das relações (LYNDEN-BELL, 2002) (MAHAAL *et. al.*, 2016) a seguir (Eq. 11 a 16):

$$r_p = \text{sen}(\varphi) \quad (11)$$

$$x_p = s - \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) + \frac{g(\varphi)}{s}(1 - Kf(\varphi))\cos^4\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (12)$$

$$r_s = \frac{2sK f(\varphi)\tan\left(\frac{\varphi}{2}\right)}{Kf(\varphi)\tan^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) + g(\varphi)} \quad (13)$$

$$x_s = -r_s \cot(\varphi) \quad (14)$$

$$g(\varphi) = s - (1 - s) \tan^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (15)$$

$$f(\varphi) = \left|\frac{g(\varphi)}{s}\right|^{\frac{s}{s-1}} \quad (16)$$

Os índices p e s referenciam-se ao primário e ao secundário, respectivamente. As variáveis r_p e x_p indicam respectivamente, a distância do primário ao foco (situado na origem) ao longo do eixo horizontal, doravante denominado eixo r e a distância do primário ao foco ao longo do eixo vertical, representando a altura, doravante denominado eixo x. Já as variáveis r_s e x_s , indicam as respectivas distâncias do secundário ao foco ao longo do eixo r e a distância do secundário ao foco ao longo do eixo x do aplanático secundário.

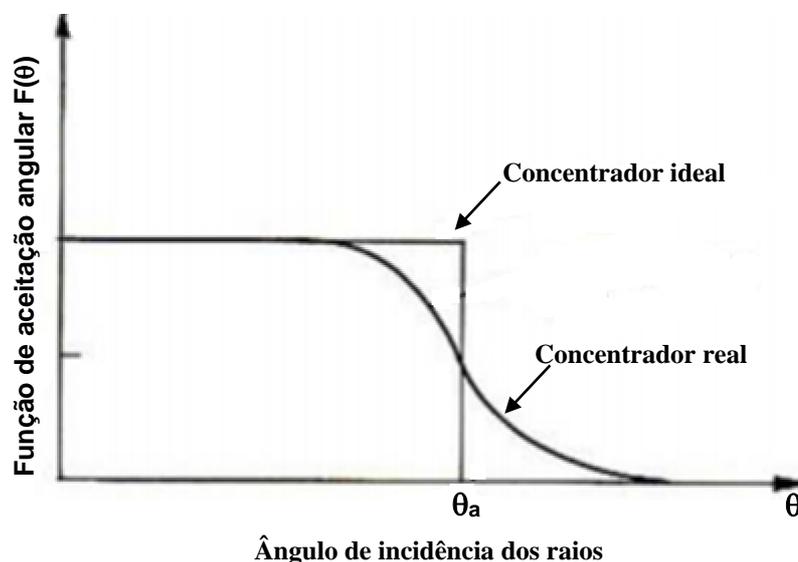
Como podem ser visualizadas, as equações relacionam as dimensões do primário e secundário do aplanático aos parâmetros s e K. Logo, atendidas estas condições explicitadas nas equações que definem o aplanático, podem ser encontrados diferentes concentradores de geometria aplanática ao se variar os parâmetros que o definem (MARSHALL *et al.*, 2015).

2.3 FUNÇÃO DE ACEITAÇÃO ANGULAR

A função de aceitação angular $F(\theta)$ é uma das principais propriedades dos concentradores, sendo assim definida como a fração dos raios solares que incidem sob

determinado ângulo na abertura do concentrador e conseguem atingir o absorvedor (RABL, 1985). A função de aceitação angular comporta-se conforme indicado na Figura 8, de forma que, para o concentrador ideal, $F(\theta)=1$ para $0<\theta<\theta_a$ e $F(\theta)=0$ para os demais valores de θ . O ângulo θ_a é o máximo ângulo em que os feixes de raios são aceitos por um concentrador. Para os concentradores reais, a transição não é tão abrupta em função de o sol não ser considerado uma fonte pontual. Assim, para valores de θ menores que θ_a , mas próximos a θ_a , o valor de $F(\theta)$ é menor que 1, assim como para valores de θ maiores que θ_a , mas próximos a θ_a , o valor de $F(\theta)$ é maior que 0.

Figura 8 - Função de Aceitação Angular $F(\theta)$ em função do ângulo θ que atinge o concentrador



Fonte: Adaptado de FRANDENRAICH; LIRA, (1995)

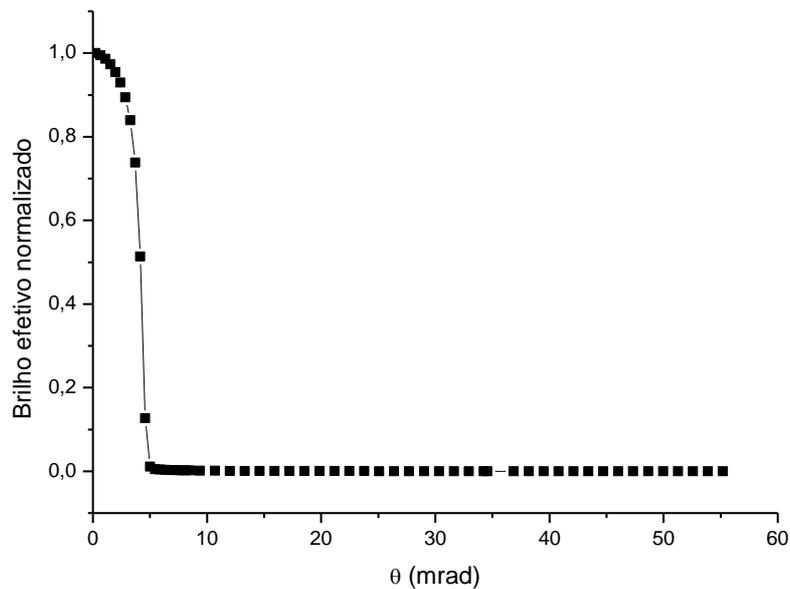
2.4 BRILHO SOLAR

O Sol emite luz em todas as direções, (CHAVES, 2008), em função da distância do Sol à Terra e dos raios de ambos, a radiação solar é distribuída na terra por meio de um cone de radiação solar de semiângulo θ_s . O cone de ângulo completo ($2\theta_s$) em que está contida a radiação solar que atinge a terra é denominado cone solar. A intensidade de cada raio depende do seu ângulo dentro do cone solar. Há diversas formas tanto teóricas, quanto experimentais para se modelar o comportamento do brilho do sol de acordo com o ângulo de incidência do sol.

Segundo RABL (1985), somente coletores com concentração elevada são sensíveis aos detalhes da distribuição de brilho angular do sol, sendo o caso que está proposto no presente

trabalho que trata de concentração aplanática. Uma distribuição de brilho solar típica é listada no (Anexo A) como $B(\theta)$ [$\text{W}/\text{m}^2\text{-sterad}$] versus distância angular θ do centro do sol; também é apresentado graficamente na Figura 9 em forma adimensional. Esta distribuição é a média simples de todos os dados solares e circumsolares obtidos pelo telescópio circumsolar de Lawrence Berkeley Laboratory (RABL, 1985).

Figura 9 - Distribuição de Brilho



Fonte: Adaptado de RABL (1985)

A distribuição da função brilho apresenta valores elevados na região central do sol, ou circumsolar, mas segue diminuindo perto da borda, conforme ilustrado na Figura 9 e detalhado na tabela contida no Anexo A, caindo drasticamente vários graus de magnitude na região de 4,65mrad até 55mrad. O escurecimento do membro do disco solar é causado pela absorção e dispersão na fotosfera do sol e da atmosfera da Terra. Se o sol irradiasse isotropicamente e se não houvesse dispersão de ângulo estreito na atmosfera, então o brilho do disco solar seria perfeitamente uniforme. Assim, há diversos modelos utilizados para se inserir em simulações dessa distribuição solar e de seus efeitos sobre concentradores solares de elevada concentração.

O brilho efetivo do sol é fundamental para o cálculo do fluxo de radiação que vem a atingir o absorvedor a partir de um concentrador solar de alto ganho, vindo a ser utilizado para dimensionamento da concentração efetiva a atingir o absorvedor em uma configuração utilizando aplanáticos. Para representar a distribuição do brilho do sol, há diversos modelos,

sendo que os modelos mais utilizados na literatura (WINSTON *et al.*, 2005), (OSTROUMOV *et al.*, 2009) consideram o sol com uma distribuição de radiação isotrópica. O desvio padrão angular dos erros do sol, ópticos e especulares somado ao semiângulo solar θ_s considerado vale 9mrad, aproximadamente 2 sóis e sendo representada ao longo do texto como θ_T . Assim, a radiação solar já com o desvio padrão angular dos erros é modelada ao longo do trabalho como sendo distribuição uniforme de $-\theta_T$ a $+\theta_T$, ou equivalentemente de -9mrad a 9mrad.

2.5 EFICIÊNCIA ÓPTICA

A função brilho efetivo $B_{eff}(\theta)$ fornece a intensidade do sol proveniente de um cone de radiação solar θ , podendo ser modelada por uma distribuição uniforme, como apresentado na seção anterior. Para o cálculo da radiação que chega em um absorvedor, é feita a convolução da função de aceitação angular pelo brilho efetivo ao longo da distribuição de radiação do sol (Eq. 17). O brilho efetivo é modelado neste trabalho como sendo uma distribuição uniforme entre +9mrad e -9mrad (por considerar os erros totais do sol, ópticos e especulares especulares, além do cone solar). A função aceitação angular $F(\theta)$ define o quanto dessa radiação chega ao absorvedor (RABL; BENDT, 1982), sendo menor ou igual a 1. A função de aceitação angular é uma característica da geometria do concentrador solar (FRAIDENRAICH *et al.*, 2017). O fluxo total de radiação aceita pelo absorvedor é obtido por meio da convolução dessas duas funções, como indica a Eq. 17.

$$I_{in} = \int_{-\infty}^{\infty} d\theta F(\theta) B_{eff}(\theta) \quad (17)$$

As dimensões do receptor são consideradas quando calcula-se a concentração geométrica (C). A radiação total incidente é representada por I_b e indicada pela Eq. 18.

$$I_b = \int_{-\infty}^{\infty} B_{eff}(\theta) d\theta \quad (18)$$

O fator de interceptação (γ) é a razão entre o fluxo de radiação que atinge o absorvedor (I_m) e o fluxo de radiação incidente total (I_b) em um determinado ponto cuja relação está indicada na Eq. 19.

$$\gamma = \frac{I_{in}}{I_b} = \int_{-\infty}^{\infty} d\theta \cdot \frac{F(\theta) B_{eff}(\theta)}{I_b} \quad (19)$$

Para o cálculo da concentração efetiva, deve-se considerar, não apenas o fluxo da radiação, mas a intensidade dela, que incide no concentrador com valor uniforme, contudo, ao refletir do primário ao secundário e ao absorvedor, sofre redução em intensidade em função da refletividade (ρ), absortividade (α_{ab}) e transmissividade (τ) de forma que a Eq. 20 apresenta a eficiência óptica (η_o) de um sistema concentrador.

$$\eta_o = \rho_c \cdot \alpha_{ab} \cdot \tau \cdot \gamma \quad (20)$$

Onde,

α_{ab} é a absortividade do absorvedor

ρ_c é a refletividade dos espelhos primário e secundário

τ é a transmissividade da envoltória do absorvedor

A eficiência óptica (η_o) também é considerada como sendo a razão entre a quantidade de radiação que chega ao absorvedor em relação à radiação incidente no concentrador, assim, obtém-se a Eq. 21.

$$\eta_o = \frac{\text{radiação que alcança o absorvedor}}{\text{radiação incidente no concentrador}} \quad (21)$$

Assim, a concentração efetiva que atinge um absorvedor depende dos erros ópticos pelo fato de o sol não ser uma fonte pontual, depende dos erros especulares, que decorrem das imperfeições do material que são feitos o refletor e o absorvedor, depende da geometria do concentrador e da relação geométrica de áreas (concentração geométrica) entre o refletor e o absorvedor. Para se elevar a concentração efetiva do conjunto, devem-se buscar a excelência em materiais para melhorar a eficiência óptica (η_o), mas fundamentalmente buscar conjuntos concentradores com altas concentrações geométricas e elevados fatores de interceptação.

Os demais capítulos do presente texto descrevem os procedimentos necessários para encontrar uma configuração de concentrador solar de geometria aplanática que busque maximizar as concentrações obtidas, de forma a oferecer concentrações superiores àquelas já obtidas em configurações já existentes, bem como apresentar metodologias analíticas para dimensionamento das concentrações geométricas e efetivas dos referidos concentradores de

geometria aplanática. Esses conceitos apresentados são utilizados no presente trabalho para dimensionamento da eficiência óptica da radiação que alcança o absorvedor, sendo detalhados no capítulo de metodologia.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

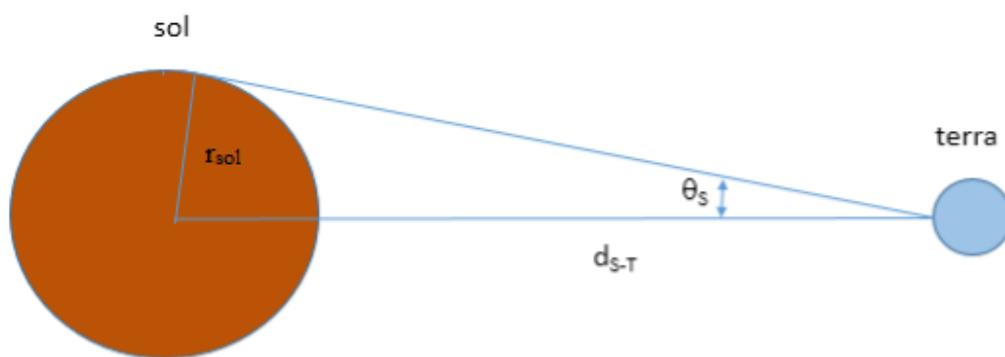
Este capítulo visa apresentar o estado da arte de concentradores de fluxo, no que tange à pesquisa e à literatura, bem como discutir a geometria aplanática que vem se apresentando como uma alternativa para elevar a temperatura de trabalho do fluido térmico. Nesse sentido, a revisão de literatura apresenta as propriedades dos concentradores solares térmicos, em seguida são apresentados alguns concentradores que visam aumentar a concentração por meio de dupla reflexão sem formação de imagens, e apresentar os registros de publicações sobre os aplanáticos, concentradores solares com dupla reflexão e que formam imagem.

3.1 PROPRIEDADES DOS CONCENTRADORES SOLARES TÉRMICOS

O sol não é uma fonte de radiação pontual, tendo o formato aproximado a uma esfera de raio (r_{sol}) $0,695 \times 10^9 \text{m}$ e sua distância média à terra (d_{s-T}) é $1,495 \times 10^{11} \text{m}$ (Figura 10). A irradiância (fluxo energético incidente por unidade de área) que chega à superfície terrestre (I_T) pode ser agora determinada considerando-se a distância sol-terra, d_{s-T} (Eq. 22).

$$I_T = \sigma T_S^4 \frac{4\pi r_{sol}^2}{4\pi d_{s-T}^2} \quad (22)$$

Figura 10 - Ângulo solar em função da distância



Fonte: o autor

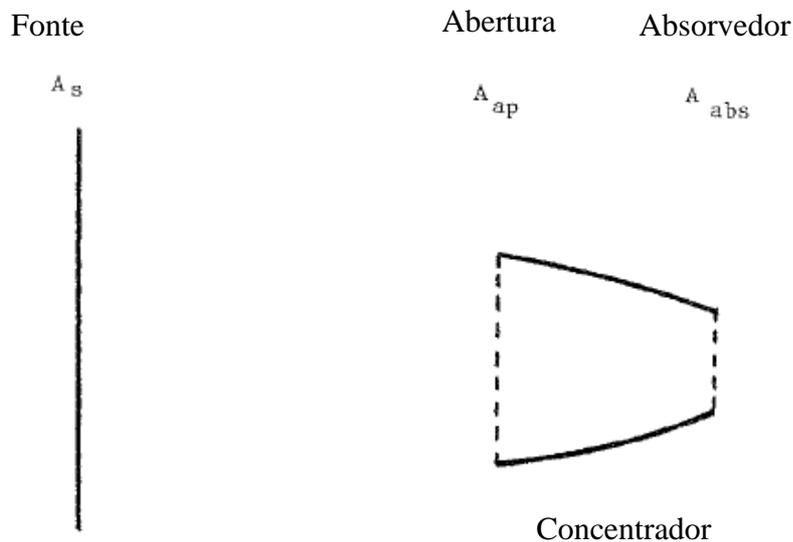
Pode-se observar, através da figura, que o semiângulo solar θ_s relaciona a distância da terra ao sol, bem como o raio do sol, de forma que o semiângulo solar θ_s vale aproximadamente $4,65 \text{ mrad}$, e o sol corresponde a um disco de raio angular θ_s (RABL, 1985), conforme indica a Eq. 23.

$$\text{sen}\theta_s = \frac{r_{sol}}{d_{s-T}} \quad (23)$$

Considerando o sol como a fonte, a abertura do concentrador e o absorvedor conforme indicados na Figura 11, A_{ap} é a área iluminada pelo sol, de temperatura T_s e raio r_{sol} . A densidade de fluxo solar $4\pi r_{sol}^2 \sigma T_s^4$, diminui com a distância Sol-Terra (d_{s-T}). A abertura do concentrador A_{ap} recebe o fluxo conforme indicado na Eq. 24.

$$Q_{S \rightarrow ap} = A_{ap} \sigma T_s^4 \frac{r_{sol}^2}{d_{s-T}^2} \quad (24)$$

Figura 11 - Esquemático geométrico de troca de radiação entre a fonte e o absorvedor



Fonte: Adaptado (RABL, 1985)

O valor máximo de concentração pode ser alcançado se toda a radiação $Q_{S \rightarrow Ap}$ que incide na abertura, chegar ao absorvedor, ou seja se a relação indicada na Eq. 25 se estabelecer.

$$A_{ap} \sigma T_s^4 \frac{r_{sol}^2}{d_{s-T}^2} = A_{abs} \sigma T_{abs}^4 \quad (25)$$

Considerando que a concentração é uma relação entre as áreas de absorvedor e do coletor da radiação (Eq. 26).

$$C = \frac{A_{ap}}{A_{abs}} = \frac{d_{S-T}^2}{r_{sol}^2} \frac{T_{abs}^4}{T_s^4} \quad (26)$$

Assim, ao associar as Figuras 10 e 11, obtém-se a Eq. 27.

$$C = \frac{A_{ap}}{A_{abs}} = \frac{1}{\text{sen}^2(\theta_s)} \frac{T_{abs}^4}{T_s^4} \quad (27)$$

Pela segunda Lei da Termodinâmica, a temperatura do absorvedor deve ser menor ou igual à temperatura do sol, caso contrário poderíamos produzir trabalho com uma única fonte de temperatura. Assim a relação indicada pela Eq. 28 é estabelecida.

$$T_{abs} \leq T_s \quad (28)$$

O caso limite é o indicado na Eq. 29.

$$T_{abs} = T_s \quad (29)$$

Para o caso limite, a concentração é a ideal em 3D, $C_{ideal3D}$ é explicitada na Eq. 30.

$$C_{ideal3D} = \frac{1}{\text{sen}^2(\theta_s)} \quad (30)$$

A Eq. 30 expressa assim, o limite termodinâmico da concentração para 3D. Considerando duas dimensões, temos a concentração ideal (Eq. 31).

$$C_{ideal2D} = \frac{1}{\text{sen}(\theta_s)} \quad (31)$$

Assim como obtido por meio do limite termodinâmico, o limite de concentração para 2D pode ser igualmente obtido por meio da abordagem da conservação da étendue. Étendue é o produto do cone de radiação incidente pela dimensão linear do coletor desta radiação. Conforme Winston *et al.* (2005), a étendue é conservada à medida em que o produto do ângulo da luz no coletor pela dimensão linear do coletor seja igual ao produto do ângulo da luz

incidente no absorvedor pela dimensão linear do absorvedor. Assim, sendo φ o ângulo de aceitação do absorvedor, e havendo conservação da étendue, temos a Eq. (32):

$$ap \cdot \text{sen}(\theta_s) = \text{abs} \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (32)$$

Onde:

ap é a dimensão linear do coletor

abs é a dimensão linear do absorvedor

Idealmente, o ângulo de aceitação do absorvedor sendo 90 graus, nos leva à concentração ideal em 2D, de forma que temos a Eq. (33) idêntica à Eq. (31):

$$C_{ideal2D} = \frac{1}{\text{sen}(\theta_s)} \quad (33)$$

Similarmente para 3D, há conservação produto do ângulo sólido que atinge o coletor pela sua área de coleção, sendo igual ao produto do ângulo sólido que atinge o absorvedor pela sua área de absorção, levando à Eq. (34):

$$A_{ap} \cdot (\text{sen}(\theta_s))^2 = A_{abs} \cdot (\text{sen}(\varphi))^2 \quad (34)$$

Considerando o ângulo de incidência no absorvedor como sendo 90 graus, obtém-se a concentração ideal em 3D por meio da Eq. (35), idêntica à Eq. (30):

$$C_{ideal3D} = \frac{1}{\text{sen}^2(\theta_s)} \quad (35)$$

Todos os raios que ingressam pela abertura, dentro do intervalo do ângulo de aceitação, são refletidos para o absorvedor como concentradores ideais (RABL, 1985). Os raios que chegam com ângulo maior que o ângulo de aceitação, propagam-se ao longo da cavidade e retornam ao ambiente. Ainda nos concentradores ideais, a superfície refletora possui refletividade unitária, assim como são unitárias a absorvibilidade do absorvedor e a transmitância da sua envoltória, de forma que idealmente, toda a energia incidente na abertura sob um ângulo menor ou igual ao ângulo de aceitação é transmitida ao absorvedor. Assim, deve-se buscar

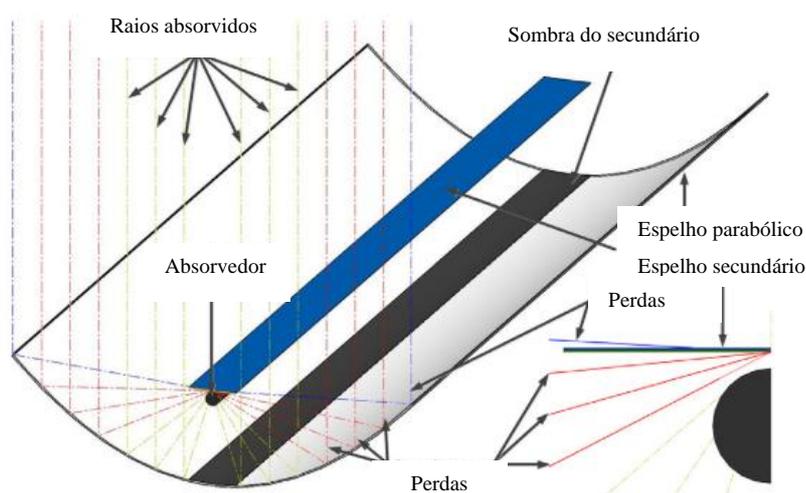
aumentar a concentração geométrica em um concentrador, sem reduzir tanto a eficiência óptica do conjunto e uma das alternativas é utilizando-se concentradores com dupla reflexão. Esses tipos de concentradores são apresentados na seção seguinte.

3.2 CONCENTRADORES SOLARES COM DUPLA REFLEXÃO

Buscando aumentar a concentração de fluxo, há diversas configurações de concentradores propostos, dentre elas, podem-se destacar o concentrador cilindro-parábola com a inclusão de um secundário, bem como os concentradores concebidos utilizando-se óptica ideal como é o caso dos concentradores construídos pelo método SMS (Simultaneous Multiple Surface) que não apresentam formação de imagem (WINSTON *et al.*, 2005).

O concentrador parabólico, tendo um espelho plano como secundário (Figura 12), apresenta um resultado de concentração superior ao do concentrador cilindro-parábola com uma única reflexão, (RODRIGUEZ-SANCHEZ; ROSENGARTEN, 2015). A inserção do secundário em concentradores cilindro-parábola tipo LS1 com concentração de 19 sóis, eleva a concentração em 66%, chegando a 31,5 sóis de concentração com um fator de sombra deste secundário sobre o primário de 16,7% (RODRIGUEZ-SANCHEZ; ROSENGARTEN, 2015).

Figura 12 - Concentrador cilindro-parábola com secundário



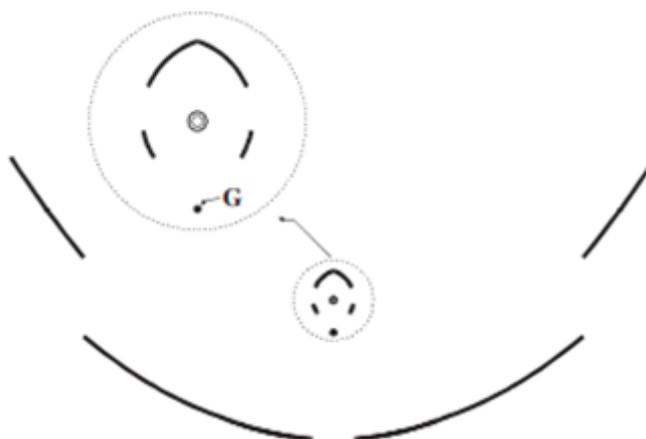
Fonte: Adaptado (RODRIGUEZ-SANCHEZ; ROSENGARTEN, 2015)

No caso de concentradores que utilizam óptica ideal, como o SMS indicado na Figura 13, a abertura angular dos raios provenientes das bordas dos espelhos primários é de $2\theta_s$, assim considerando a semiângulo solar θ_s , e esses raios de borda deve ser capazes para atravessar o

espaçamento no secundário, cujo tamanho deve ser minimizado para maximizar a concentração (CANAVARRO *et al.*, 2013), (HOMAS; GÜVEN, 1994). O método de construção dessa dupla de espelhos SMS consiste na construção do primário e do secundário compostos de forma infinitesimal, construídos segmento a segmento, com uma definição de semiângulo solar já predefinido com erros totais de 2 sóis, ou $2\theta_s$. A estrutura concentradora do tipo SMS é apresentada na Figura 13. O procedimento de construção da estrutura SMS baseia-se em dois princípios básicos: a) cálculo das condições iniciais b) extensão das curvas.

No concentrador SMS de duas superfícies, um conjunto possível de condições iniciais compreende o vértice de uma das superfícies e o eixo da outra superfície, especificamente a parte entre os dois raios de projeto que passam pelo vértice da superfície anterior (MIÑANO *et al.*, 2009).

Figura 13 – Concentrador do tipo SMS com dupla reflexão

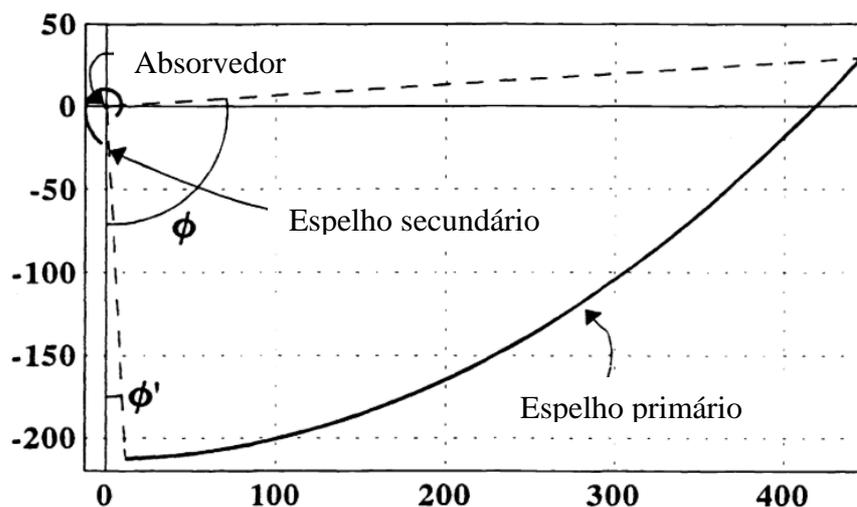


Fonte: (CANAVARRO *et al.*, 2013)

Esse concentrador apresenta uma eficiência óptica (η_o) de 0,66, ou 66% e uma concentração efetiva de 49,29 sóis. Esses números exemplificam o comportamento da eficiência óptica e da concentração, que leva a um aumento da concentração efetiva, sendo que um dos fatores que se tornam desvantagem para esta configuração é a dimensão tanto do primário quanto do secundário, o que dificulta a implementação prática deste concentrador solar.

Um outro concentrador concebido segundo o método construtivo SMS é o concentrador de cauda (snail) composto por 2 espelhos não planos e cujo nome dá-se em função do formato do tipo cauda do espelho secundário (BENITEZ *et al.*, 2017), conforme é ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Concentrador do tipo cauda



Fonte: Adaptado (BENITEZ *et al.*, 2017)

A Figura 14 apresenta estrutura de forma adimensional, retratando a proporcionalidade de cada um de seus componentes como: absorvedor, espelho primário e secundário. De acordo com a proporcionalidade da figura, pode-se obter a abertura de entrada de 5m de cada lado, absorvedor de diâmetro 21,6mm com uma concentração efetiva de 71,5 sóis considerando a refletividade unitária.

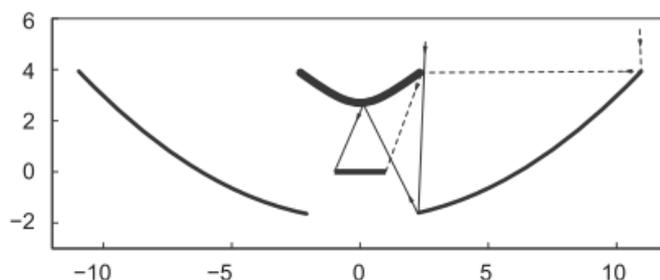
Esses concentradores solares de método de construção SMS apresentam-se como alternativas para elevar a concentração térmica em relação à obtida com uma única reflexão. Assim como as estruturas tipo SMS, a literatura indica o uso de outros tipos de concentradores solares, como é o caso do aplanático. Os avanços no aplanático como concentrador solar disponíveis na literatura são apresentados na seção seguinte.

3.3 GEOMETRIA APLANÁTICA – O APLANÁTICO COMO CONCENTRADOR SOLAR

A geometria aplanática apresenta-se como uma das mais recentes geometrias utilizadas para concentração solar, e que pelas suas características de eliminar efeitos como coma e aberração esférica, reduzem perdas de radiação no coletor, como apresentado no capítulo anterior. Após a solução das equações que descrevem o aplanático (LYNDEN-BELL, 2002), a geometria aplanática passou a ser considerada para utilização em concentração solar. Apesar de a maioria dos aplanáticos analisados não se mostrar adequada para a concentração solar, há alguns concentradores que apresentavam resultados comparáveis com os apresentados em

sistemas não formadores imagem (GOLDSTEIN; GORDON, 2011). A Figura 15 apresenta um aplanático, inicialmente proposto para concentração fotovoltaica.

Figura 15 – Aplanático proposto para concentração solar fotovoltaica



Fonte: (GOLDSTEIN; GORDON, 2011)

Como é possível observar, a geometria aplanática apresentada apresenta uma certa compacidade, face as dimensões dos espelhos primários e secundários, apresentando em sua região focal um absorvedor plano.

Segundo OSTROUMOV *et al.* (2009) há 8 diferentes configurações de aplanáticos, de acordo a combinação de valores dos parâmetros adimensionais s e K que definem um aplanático e posição do absorvedor, que podem ser positivos ou negativos, assim como os feixes que atingem o absorvedor que pode receber a maior parte dos raios provenientes do secundário na parte superior ou inferior, denominando-se assim, absorvedor voltado para cima ou para baixo. As 8 possibilidades de aplanáticos estão indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Configuração de possíveis aplanáticos de acordo com os parâmetros s , K e posição do absorvedor

Configuração	s	K	Absorvedor	Observações
1	>0	<0	para cima	Factível, porém com grandes perdas
2	>0	<0	para baixo	Factível, contudo há grande diferença nas dimensões de primário e secundário
3	>0	>0	para cima	Factível, pode-se obter máxima performance, sendo compacto.
4	>0	>0	para baixo	Factível, porém apresenta grandes dimensões. Não compacto.
5	<0	<0	para cima	Factível, pode-se obter máxima performance, sendo compacto.
6	<0	<0	para baixo	Factível, contudo há grande diferença nas dimensões de primário e secundário
7	<0	>0	para cima	Inviável fisicamente. Foco virtual. Bloqueio total.
8	<0	>0	para baixo	Inviável fisicamente. Foco virtual. Bloqueio total.

Fonte: adaptado de (OSTROUMOV *et al.*, 2009)

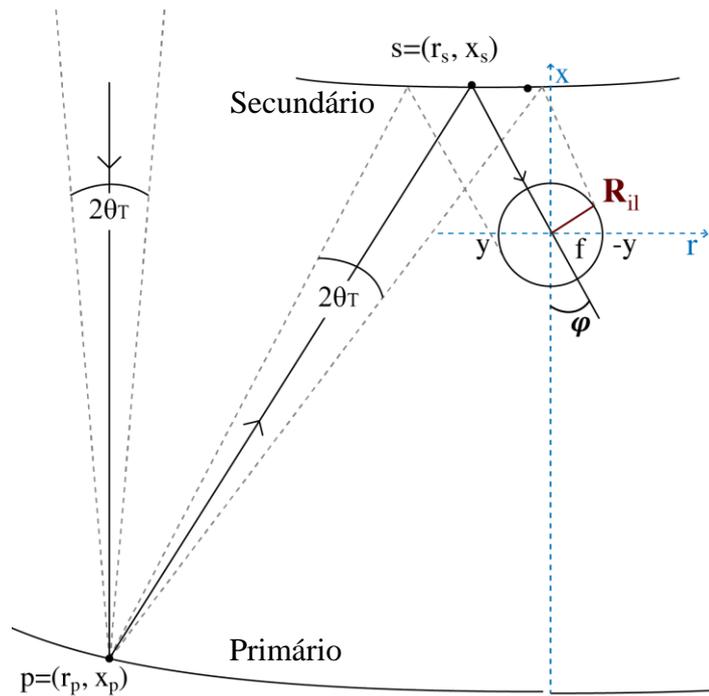
Segundo OSTROUMOV *et al.* (2009), dentre essas 8 configurações de aplanático, há 6 que são factíveis. Dessas 6, há algumas mais e outras menos adequadas para a concentração solar, visto que algumas não são compactas e outras apresentam perdas, de forma que as configurações mais adequadas são as configurações 3 e 5 indicadas na Tabela 1. Doravante, as configurações 3 e 5 serão denominadas aplanático tipo hiperbólico e aplanático tipo elíptico respectivamente e terão suas características como concentração e dimensão analisadas ao longo do presente trabalho.

Segundo MARSHAAL *et al.* (2015), as diferentes configurações de aplanáticos foram analisadas para dispositivos reflexivos e refrativos apresentando elevadas concentrações e aproximando-se do limite de concentração.

3.4 LIMITE DE CONCENTRAÇÃO DO APLANÁTICO

Para o caso específico de concentradores com dupla reflexão como os aplanáticos, o limite de concentração apresenta-se relacionando a superfície do primário e a superfície do um proposto absorvedor cilíndrico e os cones da radiação incidentes em ambas as superfícies, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Concentrador aplanático com o feixe de radiação solar iluminando uma região cilíndrica de raio R_{il}



Fonte: o autor

Como indicado na Figura 16, o limite de concentração impõe que o produto do fluxo de radiação proveniente do cone solar que atinge o primário pela dimensão do primário seja igual ao produto do fluxo de radiação que atinge uma região cilíndrica iluminada sob o cone indicado pelo ângulo φ pelo perímetro de raio de iluminação R_{il} . É importante notar que o cone de iluminação da radiação solar sob o ângulo θ_T varia de acordo com o ponto em que a radiação toca o primário. Essa região circular iluminada em torno do centro dos eixos de coordenadas apresenta raio denominado R_{il} . Esse raio (R_{il}) representa a região iluminada pela radiação solar e apresenta dimensões diferentes de acordo com o ponto em que a radiação toca o primário. A região iluminada apresenta perímetro de $2\pi R_{il}$, tendo o seu cone de iluminação variando com o ângulo φ , indicado na Figura 16. Assim, obtém-se a Eq. 36.

$$r_p \cdot \text{sen}\theta_T = \pi \cdot R_{il} \cdot \text{sen}\varphi \quad (36)$$

Por meio da equação que define um aplanático, r_p e equivale a $\text{sen}(\varphi)$, então o raio da região iluminada que define o limite de concentração do aplanático depende do semiângulo θ_T , (Eq. 37). Nesse trabalho, o semiângulo θ_T considerado é de 9mrad, aproximadamente $2\theta_s$.

Quanto menor o semiângulo considerado, maior a precisão óptica necessária para coleção da radiação solar de forma eficiente. Esse valor de aproximadamente 2 sóis está em consonância com a literatura, segundo CANAVARRO *et al.* (2013).

$$R_{il} = \frac{\text{sen}\theta_T}{\pi} \quad (37)$$

Para que um hipotético absorvedor cilíndrico disposto no mesmo local da região iluminada tenha dimensões no mínimo idênticas às da região iluminada para captar toda a radiação solar, o raio mínimo desse absorvedor deve ter dimensões iguais às da menor região iluminada (Eq. 38).

$$R_{abs_min} = \frac{\text{sen}\theta_T}{\pi} \quad (38)$$

Ao longo do próximo capítulo, serão apresentadas metodologias para dimensionamento do raio do absorvedor para coletar os feixes que chegam à região iluminada pelo concentrador aplanático. Definindo-se o raio de absorvedor, será possível mensurar parâmetros como concentração geométrica e fator de interceptação, essenciais para cálculo da concentração efetiva do sistema óptico.

4 METODOLOGIA DO TRABALHO

O presente trabalho, propõe uma nova configuração de concentrador solar fazendo uso da geometria aplanática com dupla reflexão e apresenta uma metodologia para escolha dos aplanáticos mais adequados para concentração solar com absorvedor cilíndrico e foco linear, respeitando o limite de concentração do aplanático.

A proposta parte do concentrador aplanático, buscando apresentar essa configuração não apenas como usada na bibliografia atual, com foco pontual e considerando o sol como uma fonte pontual sem os erros naturais dessa fonte de radiação, mas apresentar o aplanático como concentrador térmico de absorvedor cilíndrico e analisando os erros decorrentes de configuração geométrica como uma fonte real de radiação, com os seus erros inerentes.

Para cumprimento dessa proposta, é necessário desenvolvimento de metodologias para dimensionamento de absorvedor, primário e secundário, bem como metodologia para cálculo da concentração geométrica e em seguida, para a inserção dos erros ópticos associados ao fato de o sol não ser uma fonte pontual, de forma que o semiângulo considerado é representado por θ_T , de aproximadamente 2 sóis de dimensão angular (WINSTON *et al.*, 2005).

Cumprem-se realizar comparações e verificar a concentração tanto para a situação em que o aplanático é do tipo elíptico, quanto tipo hiperbólico e para diferentes alturas do foco em relação ao solo e, conseqüentemente, diferentes valores de parâmetros adimensionais que definem o aplanático: s e K . Essa nomenclatura de hiperbólico e elíptico dá-se em função do formato do secundário ter uma aparência de uma hipérbole e elipse respectivamente e não por apresentarem características geométricas dessas respectivas cônicas.

Primeiramente, são identificados os aplanáticos com melhores concentrações geométricas, tanto para o aplanático tipo elíptico ($s < 0$ e $K < 0$), quanto para o tipo hiperbólico ($s > 0$ e $K > 0$). O espaço de aplanáticos é obtido excursionando valores de parâmetros s , K e φ_{\max} , o que permite a escolha da tripla de parâmetros que fornece aplanáticos com configurações mais interessantes para os propósitos deste trabalho.

As equações que relacionam as dimensões primárias e secundárias do aplanático contêm os parâmetros s e K . Assim, ajustando s , K e φ_{\max} , podemos ter aplanáticos com dimensões distintas, mas deve-se ressaltar que sempre com um primário maior que o secundário. Como pode ser observado nas equações que definem o aplanático apresentadas no capítulo anterior, $\sin(\varphi_{\max})$ é equivalente à abertura numérica (NA) do aplanático. Assim, um aplanático é completamente definido quando a tripla de parâmetros s , K e φ_{\max} está definida.

Como a escolha dos parâmetros que definem o aplanático interfere de forma considerável nas dimensões e alturas do primário e secundário do aplanático, a escolha da família de aplanáticos elegíveis para concentração solar térmica deverá contemplar um compromisso de dimensões de primário, secundário e raio de absorvedor. Essas condições também foram contempladas na escolha desses aplanáticos elegíveis.

Definidos os concentradores aplanáticos mais adequados para concentração solar térmica no que tange à concentração geométrica, são identificados os comportamentos da região iluminada em torno da região focal (R_{il}) em função da dimensão do espelho primário (r_p), ou equivalentemente $\sin(\varphi)$. Com essa análise, será possível observar se o raio do absorvedor necessário para coletar a radiação da região iluminada tende a crescer, decrescer ou manter-se com mesmas dimensões ao se variar o primário do aplanático (r_p).

A etapa seguinte é a apresentação das metodologias aplicadas para a obtenção analítica da concentração efetiva do aplanático, levando-se em consideração o brilho efetivo do sol, a função de aceitação angular, fator de interceptação e eficiência óptica tanto para os feixes de radiação que ingressam diretamente a partir do primário, tendo uma única reflexão, quanto para a radiação coletada após a reflexão no secundário do aplanático, vindo a atingir o absorvedor de raio R_{abs} . As metodologias foram divididas em 2 partes, cálculo analítico da radiação que atinge o absorvedor com a primeira reflexão e com a segunda reflexão:

a) Cálculo da radiação que atinge o absorvedor com 1 Reflexão

Para o cálculo da radiação que atinge o absorvedor com 1 reflexão no primário do aplanático, foi considerado o cone de radiação solar que atinge o primário desde o ponto inicial de sua superfície (r_{pmin}) até o ponto mais extremo de sua superfície (r_{pmax}) e calculada que parte do cone de radiação atinge o absorvedor após essa primeira reflexão. A fração da radiação que toca o absorvedor com apenas uma reflexão e a radiação incidente total no primário será doravaante denominada γ_{1R} . Como parte da radiação que atinge o primário não chega a atingir o secundário, sendo absorvida de forma direta, há uma influência do γ_{1R} sobre o fator de interceptação γ_{2R} . O cálculo do γ_{2R} é apresentado no tópico a seguir.

b) Cálculo da radiação que atinge o absorvedor com 2 Reflexões

Para o cálculo da concentração efetiva que atinge o absorvedor após tocar no espelho secundário do aplanático, foi considerada a fração da radiação que não atinge o absorvedor após a primeira reflexão no primário e dimensionada a função de aceitação angular, fator de

interceptação e concentração efetiva para o aplanático. A metodologia aplicada para cálculo da radiação coletada após a segunda reflexão no aplanático considera inicialmente o absorvedor transparente, dimensionando a eficiência óptica do feixe que toca o secundário e alcança o absorvedor. Em seguida, os feixes são calculados considerando apenas a fração de radiação que deixa de atingir o absorvedor após a primeira reflexão, chegando ao secundário. Ou seja, a metodologia de cálculo de concentração solar contempla os raios solares que tocam no primário do aplanático, que refletem no secundário do aplanático, sem considerar nesse trecho a presença do absorvedor.

4.1 PREMISSAS ADOTADAS NA METODOLOGIA

Foram adotadas algumas premissas para a metodologia de cálculo de parâmetros importantes do aplanático, sendo discriminadas a seguir:

a) Sol como fonte real (não pontual) de radiação para dimensionamento de raio de absorvedor e concentração geométrica

Na bibliografia existente para o aplanático (OSTROUMOV *et al.*, 2009), (WINSTON; ZHANG, 2009), o sol é apresentado como uma fonte pontual, de forma que o foco também é pontual, não aparecendo parâmetros inerentes ao sol, bem como os erros ópticos e especulares para dimensionamento de concentração, região iluminada pela radiação e tamanho do absorvedor cilíndrico proposto. Assim, para dimensionamento da concentração solar a ser obtida, este trabalho leva em consideração as imperfeições solares, o que leva à formação de um cone de desvio padrão de erros formado pelo θ_T , praticamente duas vezes o semiângulo solar θ_s . Essas imperfeições geram uma delimitação de área de iluminação no cilindro em torno do foco localizado na origem do sistema de coordenadas. Dada a delimitação dos erros totais (θ_T), está associada uma área a iluminar uma região cilíndrica. Este trabalho usou, via de regra, 9mrad como os erros totais (θ_T). Definindo-se o raio do absorvedor, este será capaz de absorver determinado percentual da radiação coletada pelo concentrador, de acordo com o fator de interceptação calculado. A metodologia contemplará o raio de absorvedor definido para um determinado fator de interceptação associado, tanto para a primeira reflexão (reflexão no primário) quanto para a segunda reflexão (reflexão no secundário). A escolha de 9mrad como erros totais está em consonância com erros totais adotados em algumas publicações (BENDT *et al.*, 1979), (GOLDSTEIN; GORDON, 2011), (MARSHALL *et al.*, 2015).

b) Restrição de ângulo de borda do aplanático para escolha dos tipos de aplanáticos mais adequados

Foram escolhidos os aplanáticos mais adequados para a concentração solar consoante a literatura (GORDON; FEUERMAN, 2005), (GORDON, 2009) e (MARSHALL *et al.*, 2015) quais sejam: aplanático tipo hiperbólico (com parâmetros $s > 0$, $K > 0$ e absorvedor voltado para cima) e aplanático tipo elíptico (com parâmetros $s < 0$, $K < 0$ e absorvedor voltado para baixo).

Os aplanáticos adotados são reflexivos e não refrativos, em função das dimensões (profundidades) dos espelhos serem menores que as daqueles compostos por lentes. Dentre os espelhos aplanáticos dos tipos hiperbólico e elíptico, foram analisados aqueles de maior concentração solar geométrica e cujos ângulos de borda (α) estivessem na região entre 55 e 65 graus. Essa premissa foi adotada com o objetivo de selecionar, dentre os aplanáticos, aqueles com uma relação altura do absorvedor em relação ao solo, dimensão do primário e secundário do absorvedor que viabilizem a implementação prática da estrutura.

4.2 PROCEDIMENTO PARA ESCOLHA DO APLANÁTICO

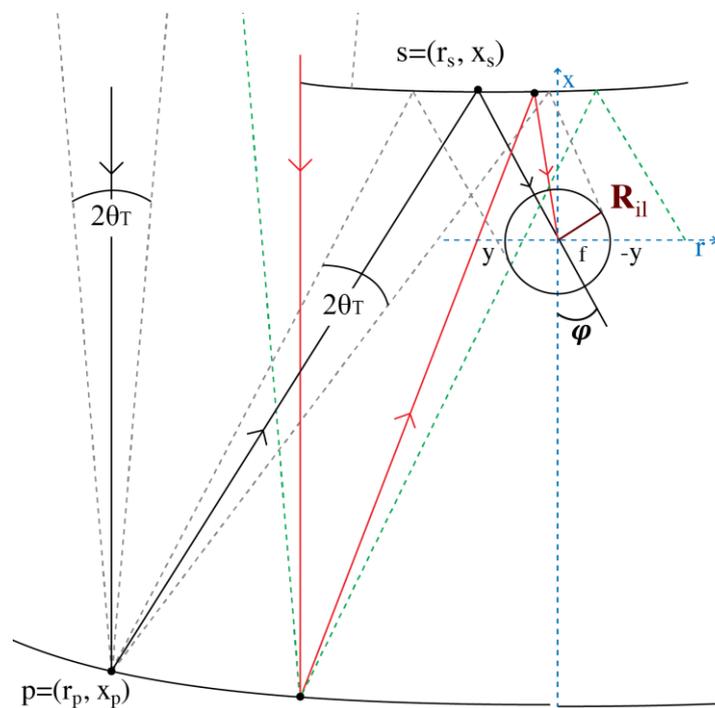
Como já mencionado na revisão bibliográfica, há 2 possibilidades de construção de aplanáticos, ou famílias de aplanáticos mais apropriadas para concentração solar, em função das características dos parâmetros que os definem, quais sejam:

- a) Aplanático tipo hiperbólico com valores de s e K positivos
- b) Aplanático tipo elíptico com valores de s e K negativos

Para a construção de um aplanático, é necessário definir os valores de s e K e de abertura numérica (NA), ou equivalentemente φ_{\max} . Ao se aumentar φ , a base do aplanático também amplia-se. Ao se observar a Figura 17, nota-se que quanto maior o erro total considerado (θ_T), mantendo-se fixos os demais parâmetros do aplanático, maior deverá ser o cone de radiação a atingir o primário, o secundário e a região iluminada (R_{II}). Supondo-se o raio do absorvedor escolhido com as mesmas dimensões da região iluminada, ao se aumentar o raio do absorvedor, reduz-se a concentração geométrica, pois esta varia inversamente com a dimensão do absorvedor escolhido e diretamente com dimensão da superfície de coleção de radiação. Assim, idealmente para se ampliar a concentração solar efetiva deve-se buscar maximizar a área de

colecção de radiação, sem ampliar tanto a superfície absorvedora, buscando manter uma eficiência óptica (η_0) elevada. Há diversos fatores que influenciam o raio da região iluminada pelo concentrador (R_{il}), dentre eles está o ponto em que o feixe de radiação solar toca o primário, bem como os erros ópticos e solares associados. Quanto menores os erros totais considerados, menor o cone de iluminação, contudo é necessário um alinhamento ótico de alta precisão, o que atualmente inviabiliza reduzir esses erros totais a valores inferiores a 9mrad. Como não se pode alterar o erro total considerado, deve-se analisar o comportamento da região iluminada em torno do foco em função das dimensões do primário do aplanático. Na figura 17 pode-se observar que a radiação que incide verticalmente num ponto do primário do aplanático (feixe preto) apresenta um cone de radiação total $2\theta_T$, de forma que o feixe central atinge o centro da região onde encontra-se o absorvedor, as extremidades do cone iluminam a região circular de raio R_{il} . Similarmente, escolhendo-se outro ponto do primário tangente ao secundário para receber a radiação (feixe vermelho), seu feixe central atinge o centro da região focal, já as extremidades do cone de radiação extrapolam a região de raio de iluminação definido por R_{il} . Isso mostra a importância de se estudar o comportamento da região iluminada em função do ponto em que o primário do aplanático é atingido.

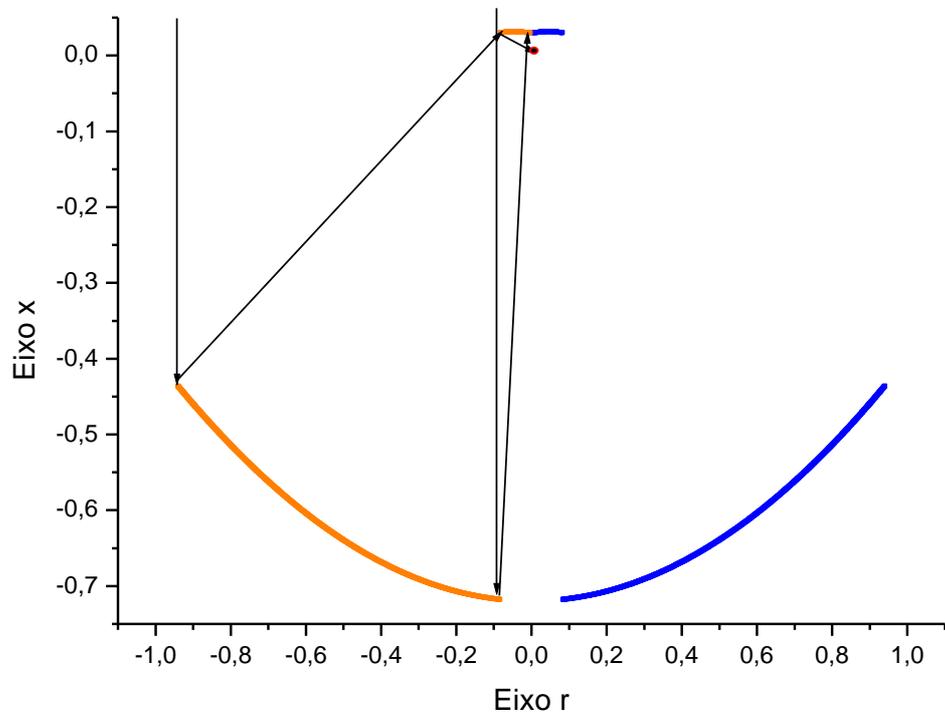
Figura 17 - Aplanático e radiação solar iluminando uma região cilíndrica de raio R_{il}



Fonte: o autor

O aplanático hiperbólico ($s > 0$, $K > 0$) ilustrado na Figura 18 apresenta os espelhos primários localizados na parte inferior da figura e os secundários na parte superior, já o foco está centrado na origem do sistema de coordenadas. As cores laranja e azul indicam os lados em que ocorrem as reflexões, de forma que nesta configuração (Figura 18) os feixes refletidos não cruzam o eixo vertical. Essa característica é fundamental para diferenciar os tipos de aplanáticos, visto que esse fato implica uma quantidade muito menor de feixes que atingem o absorvedor com apenas uma reflexão no primário, diferentemente do que ocorre na configuração de aplanático elíptico, visto a seguir.

Figura 18 - Aplanático tipo hiperbólico



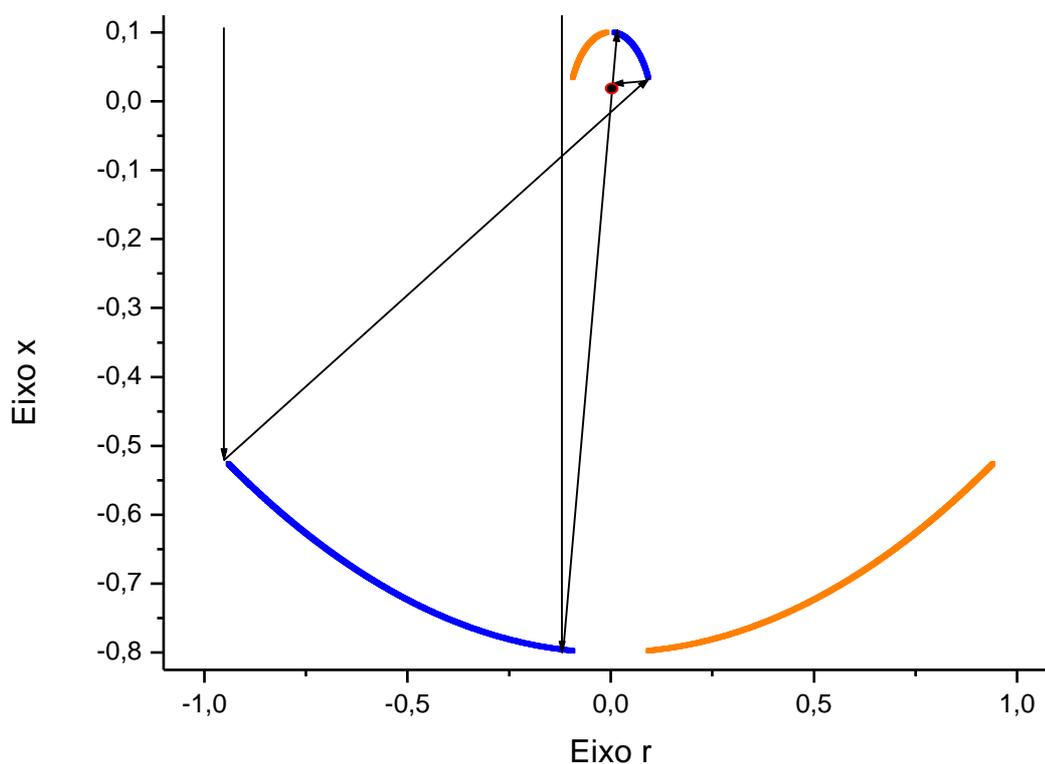
Fonte: o autor

A Figura 18 ilustra, para o aplanático tipo hiperbólico indicado pelas cores laranja e azul e os raios extremos de luz, indicados na cor preta, tocando na borda do primário e o raio que tangencia a extremidade do secundário, sem representar cone solar de semiângulo total θ_T .

É possível representar o aplanático tipo elíptico, assim como foi apresentado o aplanático tipo hiperbólico, de forma que os feixes solares extremos que o atingem como apresentado na Figura 19.

O primário do aplanático tipo elíptico está situado na parte inferior da Figura 19, o secundário na parte superior, mantendo-se o foco na origem do sistema de coordenadas, de forma que nessa configuração os feixes refletidos, indicados em cor preta, do primário cruzam o eixo vertical, diferentemente do aplanático tipo hiperbólico. Tal situação fará com que haja um maior número de feixes que tocam o absorvedor imediatamente após a primeira reflexão no primário no caso do elíptico em relação ao hiperbólico, visto que há o conceito de região focal, ou região iluminada e não um foco pontual.

Figura 19 - Aplanático tipo elíptico



Fonte: o autor

Há, então, um conjunto de feixes que não atingem o foco f situado na origem do nosso sistema de coordenadas, mas atingem um foco deslocado (f') situado próximo ao foco, mas não exatamente sobre ele, dando origem a essa região cilíndrica iluminada centrada na origem e de raio R_{il} . Esta situação é ilustrada mais na próxima seção que trata do dimensionamento do raio do absorvedor.

4.3 DIMENSIONAMENTO DO RAI DO ABSORVEDOR

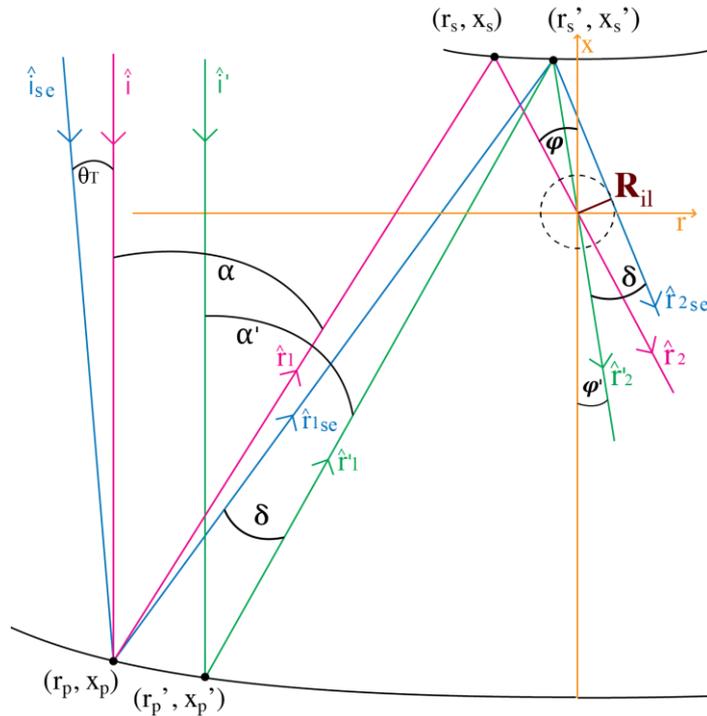
Apresentadas as duas configurações de aplanático mais adequadas para a concentração solar, a etapa seguinte é dimensionar o raio do absorvedor cilíndrico a ser disposto na origem

do sistema de coordenadas de modo a buscar maximizar a absorção dos feixes de radiação coletados pelo aplanático, considerando o sol como a fonte de radiação com feixe de radiação distribuída de forma que o semiângulo total, incluindo os erros ópticos e da superfície refletora, adotado seja θ_T .

Em princípio, não há regra mandatória para determinar univocamente a região iluminada em torno do foco (f) situado na origem do sistema de coordenadas. Considera-se que a forma mais adequada para representar a presença de raios que atingem essa região focal, seja por meio do raio de círculo tangente às bordas do cone de iluminação com centro no foco (Figura 20). Surge a figura da região cilíndrica de raio de iluminação (R_{il}) que, caso houvesse um absorvedor com mesmas dimensões que essa região de iluminação, este absorveria todos os raios coletados pelo aplanático, tanto pelo primário, quanto pelo secundário.

Utilizando-se um absorvedor para captar toda a iluminação coletada pelos espelhos aplanáticos, este deveria ter dimensões maiores ou iguais às da região iluminada em torno do foco. Caso o raio deste absorvedor escolhido tenha dimensões menores que as da região iluminada, apenas parte da radiação é coletada. Deve-se destacar que a concentração geométrica relaciona áreas de coleção da radiação e o raio do absorvedor proposto. Logo, o raio do absorvedor escolhido, deve ser grande o suficiente para abranger maior parte da área iluminada em torno da região focal, aumentando a eficiência óptica, em contrapartida deve ser o menor possível, buscando aumentar a concentração geométrica. Portanto, a escolha do raio do absorvedor tem fundamental importância na definição do sistema concentrador aplanático. Idealmente escolhe-se o raio de absorvedor com as mesmas dimensões que a região iluminada para o conjunto s , K e φ_{max} (Figura 20).

Figura 20 - Distribuição de feixes de raios que atingem o aplanático



Fonte: o autor

Para dimensionar o raio (R_{il}) da região iluminada em torno do foco, devem-se seguir as seguintes etapas em sua metodologia:

- Dada a definição dos parâmetros s e K , excursiona-se o ângulo φ desde valores próximos a zero até o valor definido como φ_{max} . Para cada ângulo φ , estão associados pares de coordenadas tanto no primário (r_p, x_p), quanto no secundário (r_s, x_s) do aplanático que são, respectivamente, os pontos em que o feixe solar toca no primário e, em seguida, no secundário.
- Calcula-se então o ângulo de borda do aplanático (Figura 20) $\alpha(\varphi)$, sendo formado pelo raio incidente solar normal ao plano de abertura do aplanático, o ponto em que há a primeira reflexão no primário (r_p, x_p) e o ponto em que esse feixe toca o secundário (r_s, x_s), sendo determinado pela Eq. 39.

$$\tan(\alpha(\varphi)) = \frac{r_p(\varphi) - r_s(\varphi)}{x_p(\varphi) - x_s(\varphi)} \quad (39)$$

- Atribui-se o valor de 9mrad ao semiângulo de incidência θ_T que inclui o semiângulo solar θ_s e os erros totais. Obtém-se o ponto em que a extremidade desse cone de incidência (θ_T) toca o secundário no ponto s' com respectivo par de coordenadas

(r_s', x_s') . Esse ponto s' indica o ponto da extremidade do cone formado pelo semiângulo θ_T em que esse cone toca o secundário.

- d) Por meio de geometria (Figura 20), identifica-se a distância do foco, que está na origem do sistema de coordenadas $(0,0)$, ao ponto do secundário (r_s, x_s) de onde vem o feixe de radiação após a segunda reflexão no aplanático. Assim, é possível identificar para cada par de coordenadas (r_p, x_p) , o raio da região iluminada associada.

Seja \hat{i} o feixe de radiação solar que atinge verticalmente o primário do aplanático no ponto p de coordenadas (r_p, x_p) , \hat{i}_{se} é o feixe proveniente do sol (à esquerda do feixe \hat{i} que faz com ele o semiângulo θ_T). Para melhor compreensão da notação utilizada na Figura, o índice 1 denota feixes após primeira reflexão (primário), o índice 2 denota feixes após a segunda reflexão (secundário). Note-se que os feixes de radiação refletidos no primário tocam o secundário em pontos distintos: o feixe que incide perpendicularmente no primário, parte do primário seguindo conforme \hat{f}_1 e atinge o secundário no ponto s (r_s, x_s) ; já o feixe que atinge o primário no ponto p sob o semiângulo θ_T é refletido no primário e segue conforme \hat{f}_{se} atingindo o secundário no ponto s' (r_s', x_s') . A partir do ponto s' , parte o feixe \hat{f}_2 até alcançar o eixo de coordenadas r transversal à direção de propagação ao raio solar \hat{i} . Caso ao invés de se dispor de um anteparo plano, a proposta parte da inserção de um absorvedor cilíndrico de raio (R_{abs}) concêntrico à região iluminada de raio R_{il} , conforme indicado na Figura 20.

Dependendo do semiângulo θ_T considerado e dependendo da extensão do primário, ou equivalentemente r_p , haverá variação do tamanho do raio da região iluminada, assim (Eq. 40)

$$R_{il} = R_{il}^{\theta_T}(r_p) \quad (40)$$

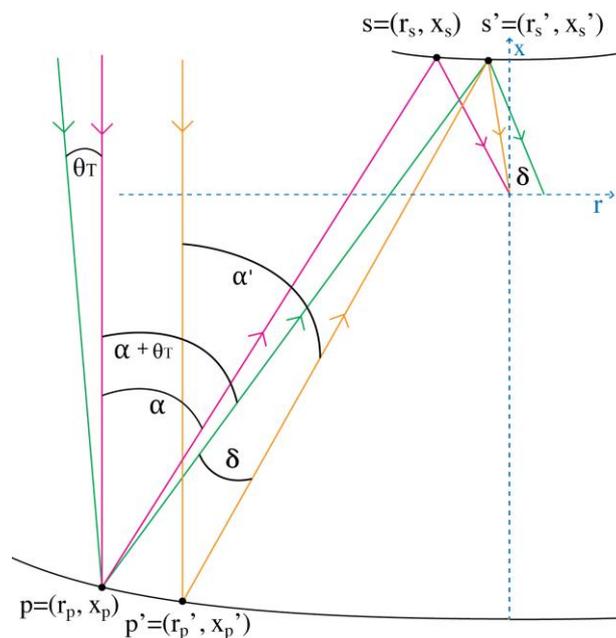
Onde r_p é a abscissa do ponto do primário na abertura, ou seja, é o ponto em que o feixe de radiação do sol atinge o primário do aplanático, e que encontra-se distante de r_p de seu eixo de simetria. Já $2\theta_T$ é a abertura angular do cone de radiação proveniente do sol já com erros totais. É interessante considerar o diâmetro da região iluminada como sendo o ângulo de visão da região focal, visto pelo feixe de luz incidente na abertura com um cone de dimensão $2\theta_T$ e atingindo a região focal.

Após a reflexão no ponto p de coordenadas (r_p, x_p) , do primário, o feixe central intercepta o secundário no ponto (r_s, x_s) e o feixe de borda do cone de radiação no ponto (r_s', x_s') . Como pode ser observado na Figura 20 e anteriormente explicitado na Eq. 39, o ângulo $\alpha(\varphi)$, medido entre \hat{i} e \hat{f} pode ser obtido por meio da Eq. 41.

$$\tan(\alpha(\varphi)) = \frac{r_p(\varphi) - r_s(\varphi)}{x_p(\varphi) - x_s(\varphi)} \quad (41)$$

Onde φ é o ângulo entre o raio \hat{f}_2 indicado na Figura 20, o eixo perpendicular ao aplanático e a origem do sistema de coordenadas. O ângulo φ determina, juntamente com os parâmetros dimensionais s e K , os pontos no primário p (r_p, x_p) e secundário s (r_s, x_s) em que raio central do cone solar toca. O raio auxiliar \hat{i}' incidente na abertura do primário no ponto p' (r_p', x_p') alcança o secundário no ponto s' (r_s', x_s') . Esses pontos foram definidos em função do semiângulo solar já com os erros totais θ_T . Assim, utilizando-se um θ_T maior, a abertura desse cone aumentará. Sendo essa uma abordagem inovadora do presente trabalho, visto que a literatura vigente não analisa o comportamento da região de iluminação de raio cilíndrico, onde pode-se dispor um absorvedor para absorção de toda ou parte da radiação solar. A distribuição dos ângulos de chegada no aplanático pode ser observada por meio da Figura 21.

Figura 21 – Distribuição de raios para identificação dos ângulos de chegada no aplanático



Fonte: o autor

Pode-se observar por meio da Figura 21 que o ângulo entre o feixe incidente normal à abertura do aplanático (cor rosa) e o feixe de radiação refletida no primário da borda do cone solar (raio de cor verde) é igual a $(\alpha(\varphi)+\theta_T)$.

Mas observando o secundário, esse ângulo $(\alpha(\varphi)+\theta_T)$ é igual ao ângulo $(\alpha'(\varphi)+\delta)$, onde $\alpha'(\varphi)$ é o ângulo entre a normal ao aplanático, o ponto s' e a origem do sistema de coordenadas. Já δ é o ângulo indicado na figura entre os feixes e cores laranja e verde, tendo como vértice o ponto s' .

Assim, ao se observar atentamente a Figura 21, a igualdade indicada na Eq. 42 nos habilita a calcular o ângulo δ . Essa equação é válida para qualquer que seja o aplanático, tipo hiperbólico ou tipo elíptico.

$$\alpha(\varphi) + \theta_T = \alpha'(\varphi) + \delta \quad (42)$$

Como pode ser observado na Figura 20, obtém-se a Eq. 43 que relaciona os pontos principais com os pontos deslocados obtidos por meio da consideração do raio de semiângulo θ_T refletido no primário do aplanático.

$$\tan(\alpha(\varphi) + \theta_T) = \frac{r_p(\varphi) - r'_s(\varphi')}{x_p(\varphi) - x'_s(\varphi')} \quad (43)$$

φ' é o ângulo de saída do secundário do aplanático até o absorvedor proveniente do primário sob o feixe \hat{i}' . O primeiro membro da Eq. 43 é conhecido, visto que $\alpha(\varphi)$ é obtido para cada φ por meio dos pares de coordenadas do aplanático e θ_T é o cone solar já com erros totais considerado. O ângulo φ é definido pela escolha do ponto do feixe de luz \hat{i} na abertura, assim, conhecemos também $r_p(\varphi)$ e $x_p(\varphi)$.

As incógnitas nos fornecem uma equação em que $r'_s(\varphi')$ e $x'_s(\varphi')$ podem ser determinados por métodos iterativos. Uma vez conhecido o ângulo de saída φ' , os dois pares de coordenadas do primário e secundário do aplanático do feixe de luz \hat{i}' podem ser determinados e portanto $\alpha'(\varphi)$ é obtido por meio da Eq. 44.

$$\tan(\alpha'(\varphi)) = \frac{r'_p(\varphi') - r'_s(\varphi')}{x'_p(\varphi') - x'_s(\varphi')} \quad (44)$$

Obtido ângulo $\alpha'(\varphi)$, pode-se retomar a Eq. 42 e calcular o valor do ângulo δ (Eq. 45).

$$\delta = \alpha + \theta_{\sigma T} - \alpha' \quad (45)$$

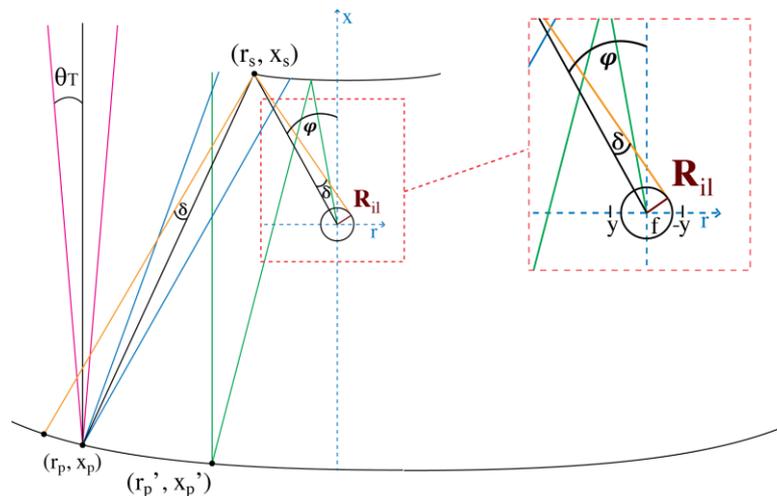
Assim, a partir da Figura 20, pode-se obter o valor do raio da região iluminada (Eq. 46) como indicado a seguir.

$$R_{il} = [(r_s')^2 + (x_s')^2]^{1/2} \cdot \text{sen}(\delta) \quad (46)$$

O raio da região iluminada R_{il} pode ser calculada definindo-se o φ_{\max} , bem como os pontos que formam o aplanático. Pode-se observar que a região focal é definida por meio dos parâmetros citados, um absorvedor cilíndrico a ser inserido no foco, deve ter o raio de dimensões iguais ou maiores às do raio da região iluminada para que absorva toda a radiação coletada a partir de determinado ponto no primário (r_p, x_p).

Os raios tangentes a uma região iluminada de formato cilíndrico de raio R_{il} equivalem a uma região plana de dimensões entre $+y$ e $-y$ (Figura 22). É possível notar que o raio da região cilíndrica iluminada depende do ponto em que o feixe solar toca o primário no ponto p de coordenadas (r_p, x_p) e do cone solar utilizado, no caso θ_T vale 9mrad. Como se propõe inserir absorvedor cilíndrico, é fundamental analisar o comportamento do raio da região iluminada de acordo com o ponto de incidência no primário desse feixe solar, para se compreender que eficiência óptica se obtém de acordo com o raio de absorvedor utilizado.

Figura 22 - Esquemático do aplanático com absorvedor cilíndrico de raio R_{abs}



Fonte: o autor

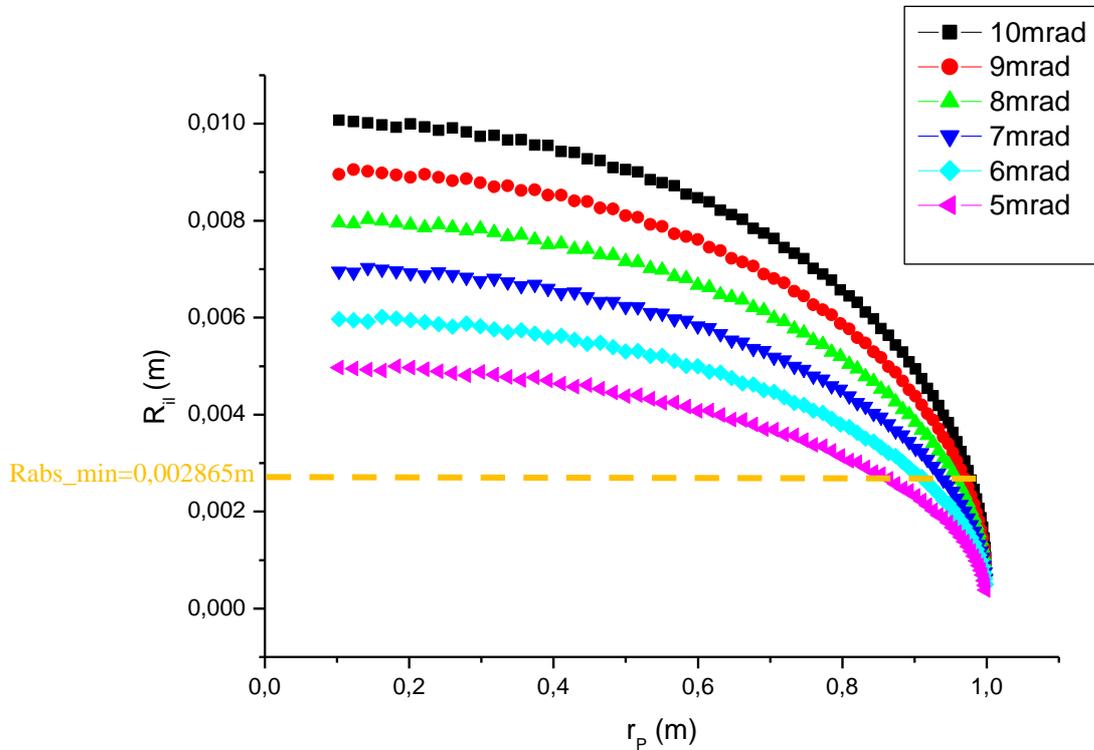
Utilizando a metodologia para dimensionamento do raio da região iluminada ao se excursionar o ângulo φ , é possível observar o comportamento deste raio R_{il} com a variação de r_p para um determinado aplanático de parâmetros s , K e φ_{max} . Por meio de software, cujo fluxograma do programa encontra-se no Apêndice A do trabalho, foi realizada a variação de φ desde valores correspondentes r_p mínimos até valores próximos de $r_p=1$, cujos resultados estão apresentados na Figura 23. Ao se aumentar r_p , pode-se observar, por meio da figura, que para um determinado θ_T fixo, que o raio do absorvedor diminui.

A Figura 23 ilustra o comportamento do raio do absorvedor em função da dimensão do primário do aplanático para diferentes valores de θ_T adotados. Em todos os casos de aplanáticos analisados, para diferentes valores de s e K , sendo eles positivos ou negativos, o comportamento do raio da região iluminada é similar, cujo raio decresce ao se ampliar o primário (r_p). É importante ressaltar que há um limite de raio mínimo para a região iluminada, tendo sido definido na seção anterior e indicado na figura em cor laranja como (R_{abs_min}). O raio mínimo da região iluminada depende fundamentalmente do θ_T considerado. Para que se tenha um absorvedor que capte a radiação no limite da abertura numérica (NA), visto que $r_{pmax}=NA$, ele deve ter raio igual ao raio da região iluminada nesse limite. Assim (Eq. 47):

$$R_{abs_min} = \frac{\text{sen}\theta_T}{\pi} \quad (47)$$

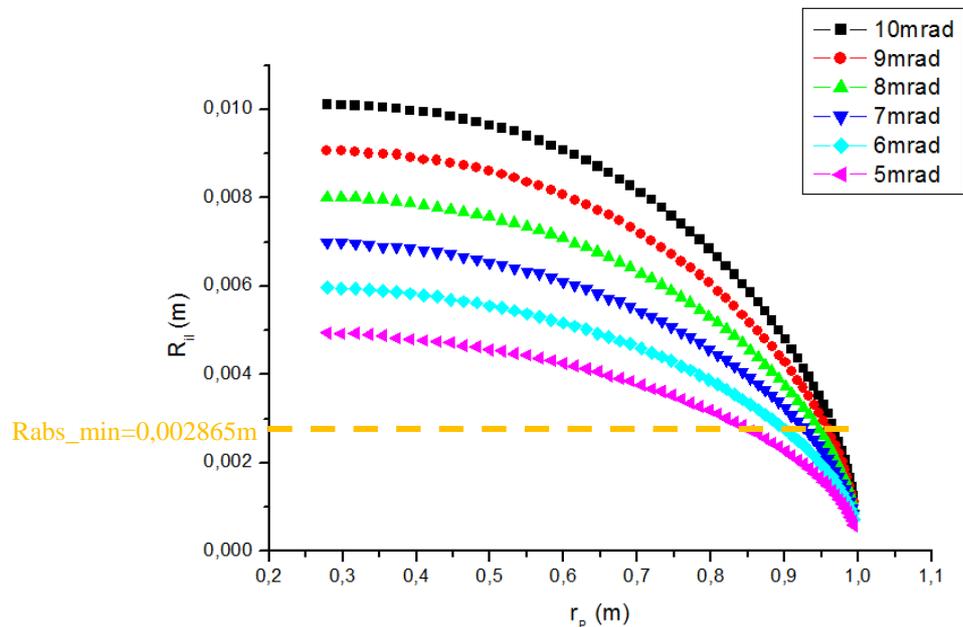
Pode-se observar que quanto maiores os erros totais considerados, maior o raio mínimo do absorvedor, permanecendo fixo independentemente de s , K e φ_{max} . Para o caso do $\theta_T=9\text{mrad}$, a região iluminada tem raio mínimo de 0,002865m ou equivalentemente 2,865mm.

Figura 23 - Gráfico do raio da região iluminada R_{il} vs r_p para aplanático elíptico com parâmetros $s=-0,9$, $K=-0,1$ e $0,1 < NA < 1$ com θ_T variando entre 5 e 10 mrad



O comportamento do raio da região iluminada decresce com o aumento do primário também pode ser verificado tanto para o aplanático tipo elíptico ilustrado na Figura 23 para os parâmetros s e K de valores negativos indicados, bem como para outros valores, inclusive para valores positivos de s e K , como os observados no aplanático hiperbólico (Figura 24).

Figura 24 - Gráfico do R_{II} vs r_p para aplanático hiperbólico com parâmetros $s=0,7$, $K=0,03$ e $0,25 < NA < 1$ com θ_T variando entre 5 e 10mrad



Fonte: o autor

Pode-se observar por meio das Figuras 23 e 24 que o comportamento é semelhante em ambos os aplanáticos e que r_p variou até valores próximos de 1. O método de dimensionamento do limite de concentração do aplanático, impõe um limite mínimo para o raio da região iluminada, indicado na figura por (R_{abs_min}) levando conseqüentemente a um limite superior para a concentração geométrica, será apresentado na seção seguinte.

4.4 METODOLOGIA PARA CÁLCULO DO RAI DO ABSORVEDOR QUE SATISFAÇA O LIMITE DE CONCENTRAÇÃO DO APLANÁTICO

Como observado na seção anterior, tanto para o aplanático tipo elíptico quanto para o tipo hiperbólico, a região iluminada reduz-se à medida em que o r_p cresce, assim, caso não houvesse uma limitação, seria possível aumentar o r_p , simultaneamente reduzindo a região focal e conseqüentemente aumentando a concentração geométrica, a se dispor de um absorvedor de mesmo raio que a região iluminada. Contudo, o limite de concentração do aplanático impõe um raio mínimo para absorção dos feixes de radiação solar em um absorvedor concêntrico à região iluminada.

Como r_p é a região que atinge o primário do aplanático e o cone solar tem semiângulo representado por θ_T , a fração da radiação que atinge o primário do aplanático vale $\text{sen}(\theta_T)$. A

máxima região iluminada no absorvedor é o seu perímetro e o cone de radiação recebido é $2\text{sen}(\varphi)$. Isso nos leva à Eq. 48, já apresentada anteriormente na Eq. 36.

$$r_p \text{sen}(\theta_T) = \pi R_{il} \text{sen}\varphi \quad (48)$$

Para a obtenção do aplanático, excursionamos o φ até o valor máximo φ_{max} . Assim, como apresentado na Eq. 47, há um r_p máximo sendo definido pelo menor raio de absorvedor que absorva na totalidade a região iluminada (Eq. 49), já apresentada anteriormente na Eq. 38.

$$R_{abs_min} = \frac{\text{sen}\theta_T}{\pi} \quad (49)$$

Por outro lado, conforme descrito na Eq. 46 que descreve o raio da região iluminada, o raio do absorvedor deve ser igual à essa região iluminada para que absorva toda a radiação, obtendo-se a relação indicada na Eq. 50.

$$R_{abs} = [(r_s')^2 + (x_s')^2]^{1/2} \cdot \text{sen}(\delta) \quad (50)$$

O raio do absorvedor indicado na Eq. 50 deve ser maior ou igual ao raio mínimo do absorvedor (R_{abs_min}) indicado na Eq. 49.

Dessa forma, haverá um valor máximo de abertura numérica (NA) para cada aplanático, quer seja hiperbólico ($s>0$, $K>0$), quer seja elíptico ($s<0$, $K<0$) para um determinado θ_T que satisfaça a condição do limite de concentração do aplanático.

Assim, a metodologia para obtenção do raio mínimo da região iluminada parte da definição dos parâmetros que definem o aplanático: valores de distância entre os vértices do primário e secundário (s) e distância da origem ou do foco ao vértice do secundário (K). Definidos esses parâmetros, faz-se variar a abertura numérica até o $NA=1$. Verifica-se, baseado no semiângulo adotado θ_T , se o raio calculado para o r_p excursionado ($r_p=NA=\text{sen}\varphi$) está dentro do limite de concentração do aplanático, ou seja, se o raio de um absorvedor proposto é maior ou igual ao raio da região iluminada para o limite quando r_p é igual à abertura numérica. Como exemplo, considerando θ_T igual a 9mrad, R_{abs_min} vale 0,00285m.

Para efeito de cálculos, no capítulo que trata dos resultados obtidos, é possível observar que o valor assumido para o θ_T é de 9mrad, buscando que o sistema venha a requerer uma precisão óptica não tão elevada como seria o caso de uma adoção de um ângulo θ_T menor.

Contudo o valor adotado para o θ_T pode ser ajustável. Já a concentração solar efetiva depende da concentração geométrica do dispositivo e também depende do fator de interceptação, cuja metodologia para cálculo é abordada na seção a seguir.

4.5 METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO EFETIVA DO APLANÁTICO

A metodologia para cálculo da concentração efetiva do aplanático divide-se em 2 partes: Parte 1: O cálculo da radiação que atinge o absorvedor após a primeira reflexão que ocorre no primário do aplanático.

Parte 2: O cálculo da radiação que não atinge o absorvedor após a primeira reflexão, atingindo então o secundário do aplanático e, em seguida, atingindo o absorvedor.

Após calculados os fatores de interceptação para ambos os casos, é dimensionada a concentração efetiva que é proveniente da relação de áreas de coleção e absorção de radiação solar e das eficiências ópticas respectivas de ambas as partes descritas nas seções seguintes. Como a eficiência óptica depende do fator de interceptação (γ), que depende da geometria do concentrador, bem como de refletividade (ρ_c), absorvidade (α_{ab}) e transmissividade (τ) que são propriedades dos materiais utilizados, para efeito de cálculos da concentração efetiva (C_{eff}), ρ_c , α_{ab} e τ são considerados unitários.

4.5.1 Metodologia para cálculo do fator de interceptação para uma reflexão no primário

A abordagem do cálculo da radiação que atinge o absorvedor parte do prévio dimensionamento de parâmetros que definem o aplanático como s , K e ϕ_{max} , assim como parte da definição do raio de absorvedor escolhido, R_{abs} e a definição do θ_T adotado.

Deve-se então dimensionar, por meio da variação de r_p , a contribuição para cada parte infinitesimal desse ponto do primário do aplanático em que o feixe de radiação toca, sendo que cada parte infinitesimal de r_p (δr_p) contribui com um cone de radiação, atingindo de forma direta o absorvedor e parte passa para atingir o secundário do aplanático. Diante dessas definições e diante da excursão do r_p desde valores próximos de 0 (r_{pmin}) até valores próximos de 1 (r_{pmax}), há quatro possibilidades de contribuição para a coleção da radiação no absorvedor com a primeira reflexão no primário que estão indicadas nas situações de 1 a 4 indicadas a seguir. É importante notar que, ao longo da excursão dos valores de r_p , não ocorre apenas uma situação,

mas um conjunto delas, em decorrência da variação da posição em que o feixe toca o primário no ponto (r_p, x_p) e do ângulo θ_T adotado.

1. Situação 1

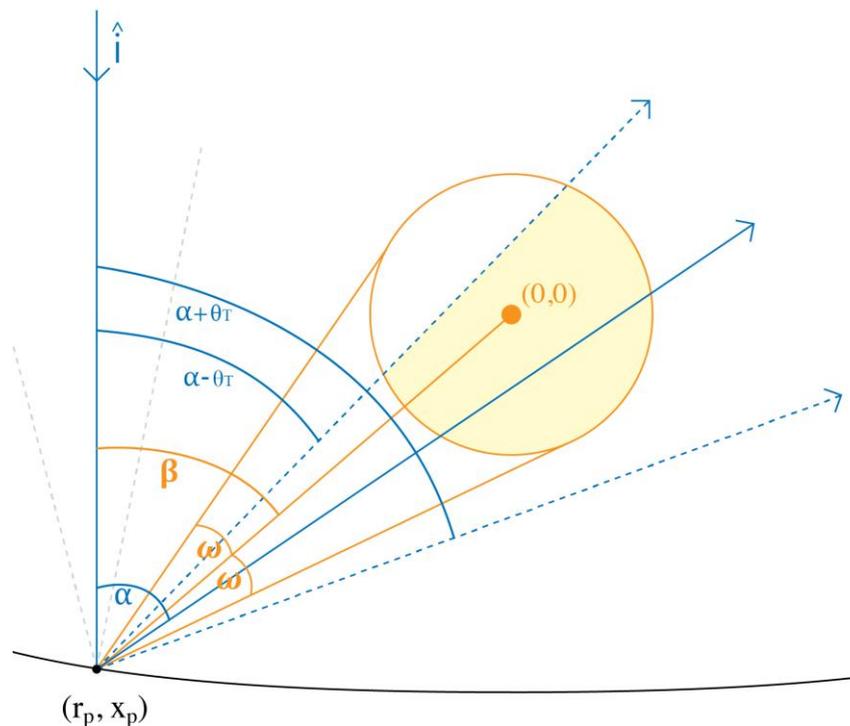
$$\begin{aligned}\alpha - \theta_T &> \beta - \omega \\ \alpha + \theta_T &> \beta + \omega\end{aligned}$$

Conforme indicado na Figura 25, temos apenas parte do cone de radiação que atinge o absorvedor proveniente de sol com ângulo total $2\theta_T$, após a primeira reflexão no primário. Nesta situação, a parte do cone de radiação que ilumina o absorvedor pode ser identificada por meio da Figura 25 e equivale à Eq. 51.

$$CI(\delta r_p) = \int_{r_{pmin}}^{r_{pmax}} \frac{(\beta + \omega - (\alpha - \theta_T)) \delta r_p}{(r_{pmax} - r_{pmin})} \quad (51)$$

É importante notar que o cone de iluminação ($CI(\delta r_p)$) depende de cada ponto e de cada parte infinitesimal de cada ponto em que o feixe de radiação solar toca no primário, por isso esse cone de radiação ser função de δr_p .

Figura 25 - Cone solar que atinge o absorvedor para a situação 1



Onde os ângulos β , ω e α são obtidos por meio das equações que os descrevem (Eq. 52 a 54).

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{r_p}{x_p}\right) \quad (52)$$

$$\omega = \text{sen}^{-1}\left(\frac{R_{abs}}{\|p\|}\right) \quad (53)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{r_p - r_s}{x_p - x_s}\right) \quad (54)$$

Onde $\|p\|$ é a distância do ponto em que o feixe de radiação solar toca o primário (r_p , x_p) até o centro do absorvedor localizado na origem do sistema de coordenadas (0,0), descrita pela Eq. 55.

$$\|p\| = (r_p^2 + x_p^2)^{\frac{1}{2}} \quad (55)$$

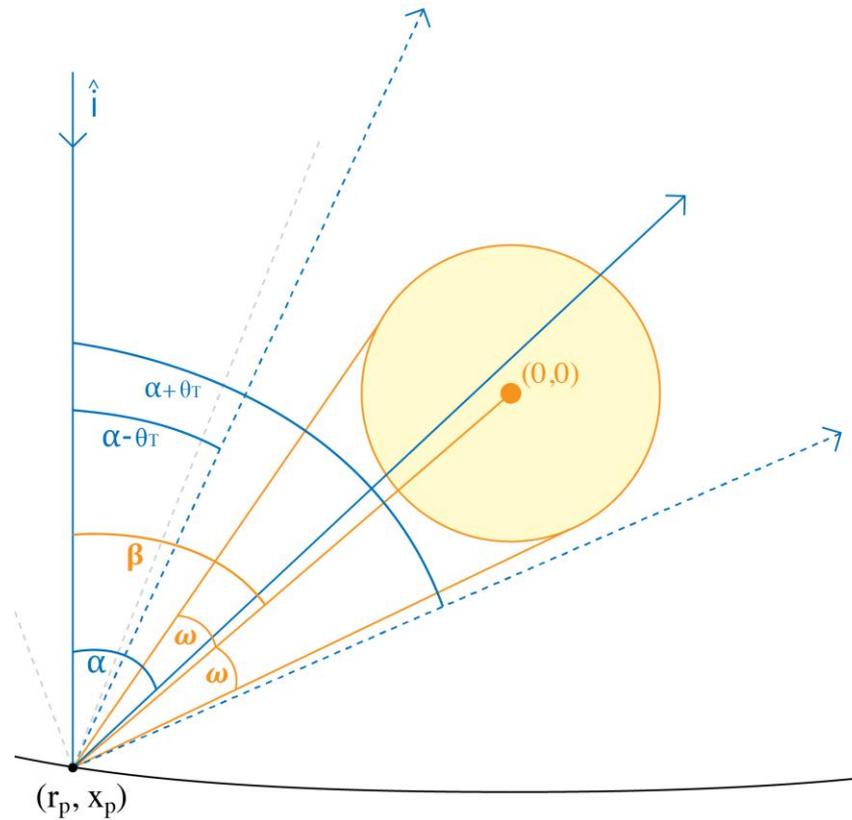
2. Situação 2

$$\begin{aligned} \alpha - \theta_T &< \beta - \omega \\ \alpha + \theta_T &> \beta + \omega \end{aligned}$$

Conforme indicado na Figura 26, temos apenas parte do cone de radiação que atinge o absorvedor proveniente de sol já incluídos erros totais, com ângulo total $2\theta_T$, a parte que atinge o absorvedor após a primeira reflexão no primário está limitada pelo raio do absorvedor escolhido. Nesta situação, a parte do cone de iluminação ($CI(\delta r_p)$) que atinge o absorvedor pode ser identificado por meio da Figura 26 e equivale à Eq. 56.

$$CI(\delta r_p) = \int_{r_{pmin}}^{r_{pmax}} \frac{2\omega}{(r_{pmax} - r_{pmin})} \delta r_p \quad (56)$$

Figura 26 - Cone solar que atinge o absorvedor para a situação 2



Fonte: o autor

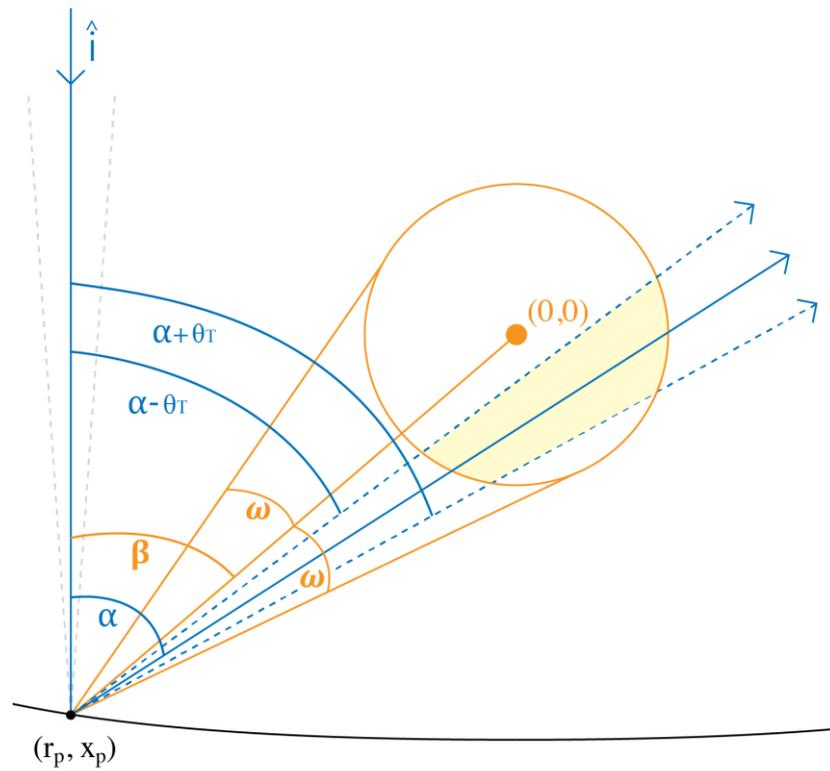
3. Situação 3

$$\begin{aligned} \alpha - \theta_T &> \beta - \omega \\ \alpha + \theta_T &< \beta + \omega \end{aligned}$$

Conforme indicado na Figura 27, a totalidade do cone de radiação que toca o primário proveniente do sol atinge o absorvedor, ou seja, o cone de radiação total é absorvido diretamente pelo absorvedor após o primeiro toque no primário do aplanático, logo, o cone iluminado no absorvedor mede $2\theta_T$. Nesta situação, a parte do cone de radiação que atinge o absorvedor pode ser identificada por meio da Figura 27 e equivale à Eq. 57.

$$CI(\delta r_p) = \int_{r_{pmin}}^{r_{pmax}} \frac{2\theta_T}{(r_{pmax} - r_{pmin})} \delta r_p \quad (57)$$

Figura 27 - Cone solar que atinge o absorvedor para a situação 3



Fonte: o autor

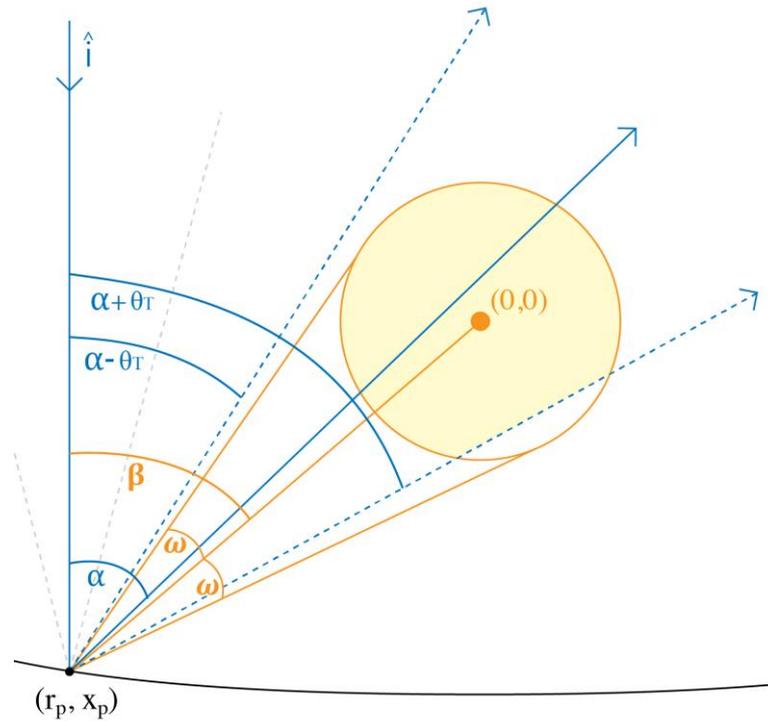
4. Situação 4

$$\begin{aligned} \alpha - \theta_T &< \beta - \omega \\ \alpha + \theta_T &< \beta + \omega \end{aligned}$$

Conforme indicado na Figura 28, apenas parte do cone de iluminação que toca o primário proveniente do sol atinge o absorvedor. Nesta situação, a parte do cone de iluminação que atinge o absorvedor pode ser identificada por meio da Figura 28 e equivale à Eq. 58.

$$CI(\delta r_p) = \int_{r_{pmin}}^{r_{pmax}} \frac{(\alpha + \theta_T) - (\beta - \omega)}{(r_{pmax} - r_{pmin})} \delta r_p \quad (58)$$

Figura 28 - Cone solar que atinge o absorvedor para a situação 4



Fonte: o autor

Calculadas as frações do cone de radiação solar que atingem o absorvedor nas 4 situações e excursionando-se o r_p do valor mínimo (r_{pmin}) que equivale ao valor máximo do secundário ($r_{smáx}$) - pois o sol atinge o primário pela sua normal em cada ponto e o secundário faz sombra em parte do primário até o seu valor máximo que é $r_{smáx}$ - até o valor máximo que é r_{pmax} ou equivalentemente NA, obtém-se o fator de interceptação para cada parte como uma relação entre o cone iluminado que atinge o absorvedor para cada valor de r_p sobre a radiação que ilumina ($RI(\delta r_p)$) o primário para cada r_p (Eq. 59).

$$\gamma_{1R} = \int_{r_{pmin}}^{r_{pmax}} \frac{CI(\delta r_p)}{RI(\delta r_p) \cdot (r_{pmax} - r_{pmin})} \delta r_p \quad (59)$$

Onde $RI(\delta r_p)$ é a componente da radiação incidente no primário, sendo composta pela contribuição infinitesimal de cada parte do primário, de forma que ele é representado pela Eq. 60.

$$RI(\delta r_p) = \int_{r_{pmin}}^{r_{pmax}} \frac{2 \theta_T}{(r_{pmax} - r_{pmin})} \delta r_p \quad (60)$$

Assim, a radiação coletada pelo absorvedor proveniente da primeira reflexão ocorrida no primário do aplanático é obtida por meio do fator de interceptação (γ_{1R}) qualquer que seja o aplanático com determinado raio de absorvedor (R_{abs}). É importante notar que o fator de interceptação total (γ_T) de cada aplanático deve considerar não apenas o caso em que há uma reflexão (sol incidindo no primário e refletindo direto para o absorvedor), mas também quando ocorrem duas reflexões (sol incidindo no primário, refletindo para o secundário e o feixe atingindo o absorvedor). Assim, tem-se (Eq. 61):

$$\gamma_T = \gamma_{1R} + \gamma_{2R} \quad (61)$$

É importante a ressaltar que para o cálculo do fator de interceptação para a segunda reflexão (γ_{2R}), por se considerar o feixe de radiação a partir da segunda reflexão, devem-se excluir os raios que já tenham atingido o absorvedor na primeira reflexão (γ_{1R}), de forma que se hipoteticamente metade dos raios solares atingissem o absorvedor após a primeira reflexão ($\gamma_{1R}=0,5$), restaria apenas metade dos raios atingindo o secundário do aplanático. Assim, tendo-se obtido um fator de interceptação considerando isoladamente a segunda reflexão (absorvedor transparente) ($\gamma_{AT2R}=0,5$), o fator de interceptação da segunda reflexão líquido seria o produto de γ_{AT2R} pelo $(1 - \gamma_{1R})$. Logo, nesse exemplo, teríamos $\gamma_{1R}=0,5$ e $\gamma_{2R}=(1-0,5).0,5$, ou $\gamma_{2R}=0,25$, fornecendo um fator de interceptação total de $\gamma_T=0,5+0,25=0,75$.

Cumpra-se, na seção seguinte, descrever uma metodologia para cálculo do fator de interceptação para o caso em que o feixe de radiação atinge o secundário e em seguida alcança o absorvedor.

4.5.2 Metodologia para cálculo do fator de interceptação após a reflexão no secundário do aplanático

A contribuição da radiação refletida no secundário do aplanático que atinge o absorvedor depende do feixe de radiação coletado no primário e que não atinge o absorvedor após a primeira reflexão. Desses feixes, uma parte dos que atingem o secundário do aplanático é refletida e atinge o absorvedor na segunda reflexão. Nesta seção, será apresentada metodologia para dimensionamento do fator de interceptação dos feixes partem do secundário do aplanático e que posteriormente atingem o absorvedor, considerando o absorvedor transparente após a primeira reflexão no primário (γ_{AT2R}).

Para cálculo do fator de interceptação nessa seção, a abordagem é diferente daquela utilizada no cálculo do γ_{1R} . Para o cálculo de γ_{AT2R} deve-se considerar a sombra que o espelho secundário faz sobre o espelho primário do aplanático, sendo ela calculada mediante a definição de alguns fatores. Inicialmente escolhem-se os parâmetros s e K e o ϕ_{max} , em seguida escolhe-se o raio do absorvedor (R_{abs}) a ser utilizado no concentrador. Com essas definições, é possível dimensionar alguns componentes, quais sejam:

- a) O fator de sombra que o secundário faz sobre o primário (Eq. 62):

$$Fator\ de\ sombra = \frac{r_{smax}}{r_{pmax}} \quad (62)$$

O fator de sombra é a razão, como explicitado na Eq. 62, entre a extremidade máxima do secundário e a extremidade máxima do primário. Os valores de r_{smax} e r_{pmax} são únicos para o conjunto que define o aplanático: s , K e ϕ_{max} .

- b) Concentração geométrica do aplanático com sombra (C_{cs}) (Eq. 63)

$$C_{cs} = \frac{(r_{pmax} - r_{smax})}{\pi R_{abs}} \quad (63)$$

Calculados o fator de sombra e concentração com sombra para determinado raio de absorvedor R_{abs} , deve-se obter o fator de interceptação dos feixes que atingem o absorvedor, dada a distribuição de brilho considerada.

Função Aceitação Angular

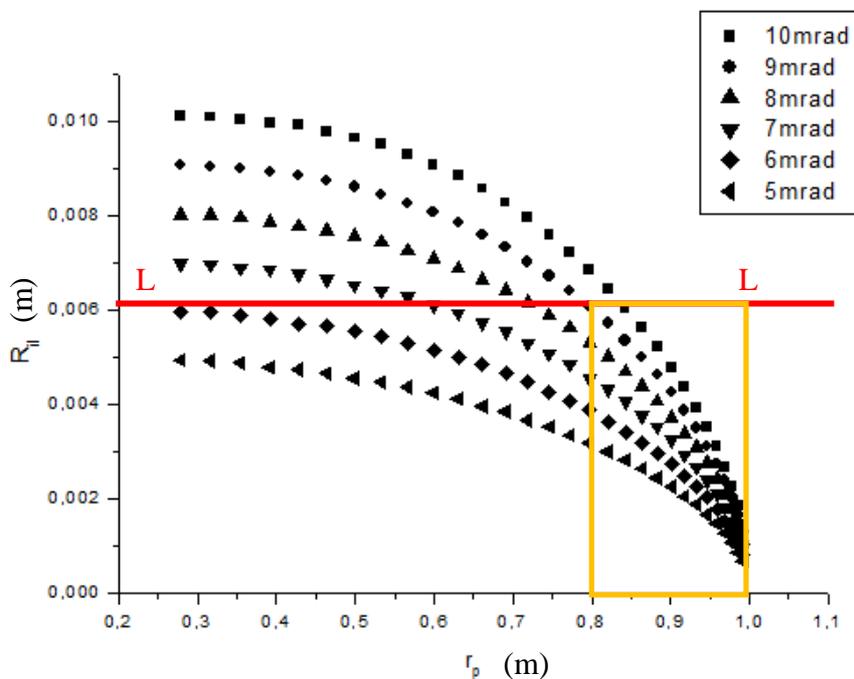
Para cálculo da concentração efetiva do absorvedor, não basta a obtenção da concentração com sombra, faz-se necessário contemplar a função aceitação angular $F(\theta)$ inerente ao conjunto de espelhos aplanáticos previamente definidos. Para tanto é necessário definir a distribuição de radiação a ser adotada para representar a forma como a radiação solar pode ser aproximada, ou representada.

Será considerada a família de raios da região cilíndrica iluminada em torno do foco do concentrador $R_{il}(r_p, \theta_T)$ ilustrada na seção anterior, e se assumirá que será feita a escolha de um absorvedor de raio específico (R_{abs}) para a absorção da radiação coletada pelo aplanático, como ilustrado na Figura 29.

Supondo que o raio do absorvedor escolhido (R_{abs}) seja igual a 0,006m ou 6mm, isso indica, como pode ser observado na Figura 29, que para esse raio escolhido, toda a radiação é coletada pelo absorvedor, logo $F(\theta_T \leq 6mrad)=1$. Ou, equivalentemente, o que pode ser observado na Figura 29 é que abaixo da linha (L-L) os raios iluminam uma região circular centrada na origem de raio R_{il} tem dimensão menor que a do raio do absorvedor escolhido (R_{abs}), logo, para esse raio de absorvedor e esse desvio padrão dos erros totais considerado (θ_T), toda a radiação seria coletada.

Supondo que o θ_T escolhido seja de 9mrad, haverá um maior espalhamento de radiação no cone de radiação considerado, de forma que o raio da região iluminada (R_{il}) aumenta. Isso implica que a região iluminada terá raios maiores que o definido pela linha L-L (6mrad), assim, apenas uma fração dos feixes solares atingirá o absorvedor definido de raio (R_{abs}) 0,006m, sendo que a fração que atingiria esse absorvedor completamente está indicada pela área delimitada pelo retângulo laranja na Figura 29, as demais regiões do aplanático teriam apenas uma fração da radiação atingindo o absorvedor com esse raio definido.

Figura 29 - Gráfico do raio da região iluminada (R_{il}) versus r_p para aplanático hiperbólico de parâmetros $s=0,75$, $K=0,03$ e $NA=1$ com θ_T variando de 5mrad a 10mrad.

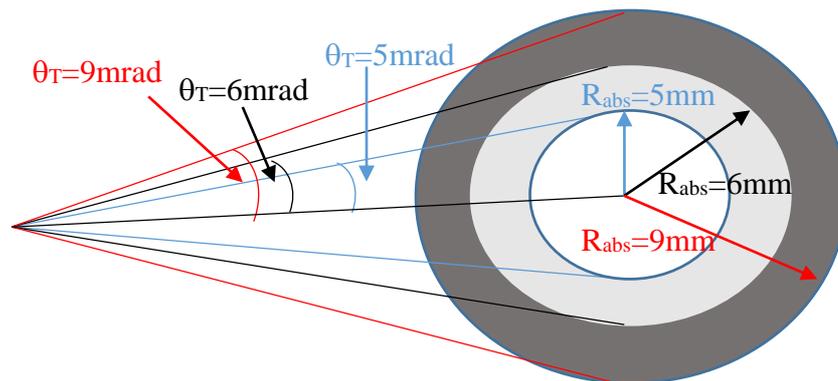


Fonte: o autor

Por meio da Figura 29, também é possível observar que acima da linha (L-L), ou seja para o raio de absorvedor escolhido como sendo 0,006m, só são absorvidos na totalidade os cones de radiação para θ_T iguais ou menores que 6mrad.

Por meio da Figura 30, pode-se observar que o cone incidente com $\theta_T=5\text{mrad}$ é mais estreito que os cones considerados em preto $\theta_T=6\text{mrad}$ e vermelho $\theta_T=9\text{mrad}$, de forma que para $\theta_T=5\text{mrad}$ não há perda de radiação, à medida em que o θ_T cresce, as perdas surgem. Considerando $\theta_T=6\text{mrad}$, para a região de $R_{\text{abs}}>0,006\text{m}$ há perda parcial de radiação. Considerando $\theta_T=9\text{mrad}$, toda a região de $R_{\text{abs}}<0,009\text{m}$ é completamente iluminada.

Figura 30 – Região de perdas para diferentes raios de absorvedor e cones de radiação



Fonte: o autor

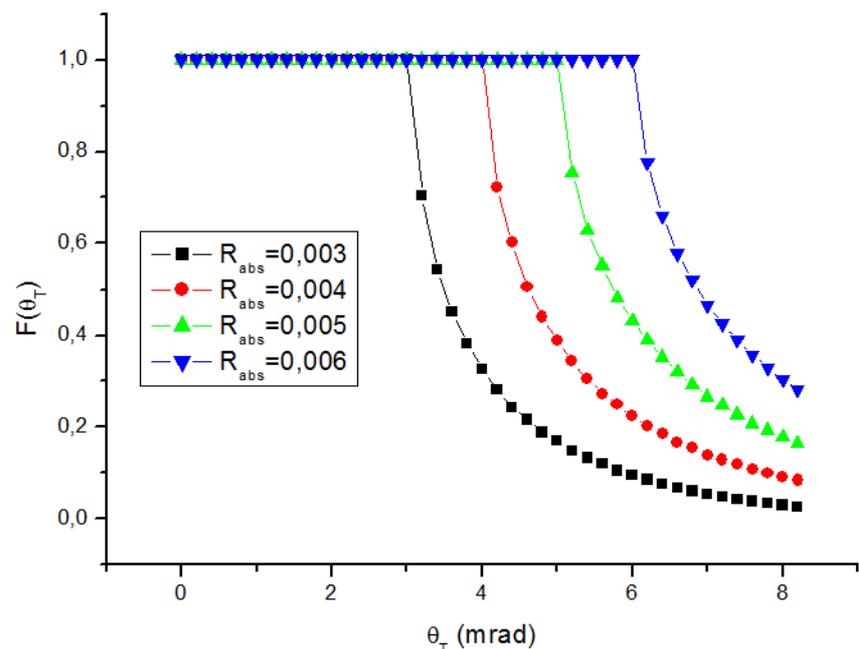
Ao observar a Figura 29, temos que o segmento (L-L) delimita o raio da região iluminada, no caso $R_{\text{il}}=0,006\text{m}$, quando $r_p=r_{\text{pmin}}$, o ângulo associado a esse r_{pmin} é θ_m . Entende-se por θ_m o menor desvio angular dos erros totais para o qual a região iluminada é completamente absorvida por absorvedor, ou seja $R_{\text{abs}} \geq R_{\text{il}}$. Assim, para todo $(\theta_T \leq \theta_m)$, toda a radiação é coletada, logo a função aceitação angular vale 1.

Para desvio angular dos erros totais θ_T maiores que θ_m ($\theta_T > \theta_m$), a aceitação da radiação é parcial e pode ser quantificada pelo segmento de linha (L-L) entre o intervalo angular da interseção da função e o máximo intervalo angular (θ_M) ($r_p - r_{\text{pmax}}$) dividida por $(r_{\text{pmax}} - r_{\text{pmin}})$. Assim, a função de aceitação angular depende da relação descrita na Eq. 64.

$$F(\theta_T, R_{abs}) = \frac{r_p - r_{smax}}{r_{pmax} - r_{pmin}} \quad (64)$$

Como pode-se observar por meio da Eq. 64 a função aceitação angular depende fundamentalmente da geometria do aplanático, da relação entre tamanhos de seus refletores primário e secundário, bem como do raio de absorvedor escolhido e dos erros totais considerados (θ_T). Quanto maior o raio do absorvedor, mantendo-se os demais parâmetros do aplanático, mais raios coletados pelo aplanático são absorvidos, levando a aumentar o valor da função de aceitação angular. O comportamento da função de aceitação angular $F(\theta_T)$ versus o desvio angular dos erros totais considerado θ_T pode ser observado por meio da Figura 31. Em que, para um $\theta_T=6\text{mrad}$, pode-se observar que a função aceitação angular vale aproximadamente 0,1 para $R_{abs}=0,003\text{m}$, já para $R_{abs}=0,004\text{m}$, $F(\theta_T)$ vale aproximadamente 0,2. Para $R_{abs}=0,005\text{m}$ $F(\theta_T)$ vale aproximadamente 0,4 e para $R_{abs}=0,006\text{m}$, $F(\theta_T)=1$.

Figura 31 - Gráfico de $F(\theta_T)$ para um aplanático hiperbólico de parâmetros $s=0,75$, $K=0,03$, $NA=0,94$ $0,003\text{m} < R_{abs} < 0,006\text{m}$ vs θ_T (mrad)



Fonte: o autor

Ao se observar a Figura 31, pode-se notar que a função aceitação angular reduz-se à medida em que os erros ópticos considerados crescem. Contudo, para se dimensionar a

concentração efetiva, devem ser considerados outros aspectos, como fator de interceptação e brilho efetivo do sol explicitados a seguir.

Fator de Interceptação e Brilho Efetivo do Sol

É importante ressaltar que para o cálculo do fator de interceptação (γ) devem-se levar em consideração a função brilho efetivo $B_{eff}(\theta)$ e a função aceitação angular $F(\theta)$. A função aceitação angular depende fundamentalmente da geometria do aplanático, já o brilho efetivo depende da função distribuição de radiação que representa o cone solar, bem como o ângulo considerado para o cone solar, não sendo o brilho efetivo uma característica física do aplanático, sendo sim característica da fonte de radiação ou de sua modelagem adotada.

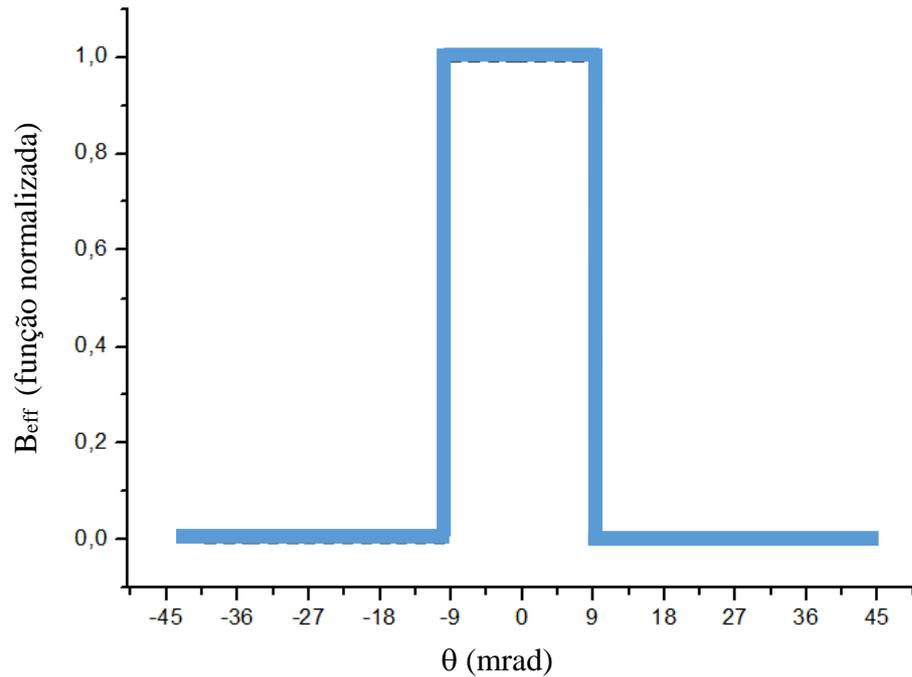
De acordo com a função utilizada para representar o brilho efetivo do sol, pode haver uma grande variação no fator de interceptação tanto para o aplanático quanto para outros conjuntos de elevada concentração solar, visto que ele é obtido por meio da convolução da função aceitação angular com a função brilho efetivo.

Conforme descrito no capítulo de conceitos preliminares, o fator de interceptação relaciona toda a radiação recebida no primário do aplanático com a radiação que atinge o absorvedor. A radiação que atinge o absorvedor depende da geometria do aplanático, de forma que essa geometria altera a função aceitação angular e a distribuição de brilho efetivo ao longo do semiângulo solar. O fator de interceptação é a razão entre o somatório de toda a radiação recebida no absorvedor e toda a radiação emitida pela fonte que atinge o coletor, no caso o sol. O fator de interceptação é sempre menor ou idealmente igual a 1, conforme indicado na Eq. 65. (BENDT *et al.*, 1979).

$$\gamma(\theta_T, R_{abs}) = \frac{\int_0^\infty F(\theta, R_{abs}) * B_{eff}^\sigma(\theta) d\theta}{\int_0^\infty B_{eff}^\sigma(\theta) d\theta} \quad (65)$$

No presente trabalho, foi utilizada a função retângulo com erro total de 9mrad conforme ilustrado na Figura 32.

Figura 32 - Gráfico $B_{\text{eff}}(\theta)$ vs θ



Fonte: o autor

Assim, para o cálculo do fator de interceptação obtido tendo o aplanático e absorvedor definidos, temos a função de aceitação angular para cada semiângulo solar (θ_s), contudo a distribuição do brilho efetivo do sol pode ser simulada usando-se diversas funções, sendo a distribuição do brilho uma característica da fonte (sol) e não do concentrador utilizado. A utilização da função retângulo para representar o brilho efetivo (Figura 32) dá-se em função de diversas publicações remeterem a essa função para representação do brilho efetivo (OSTROUMOV *et al.*, 2009), (GORDON, 2010).

Para a obtenção da concentração efetiva, após calculado o fator de interceptação, deve-se obter a eficiência óptica, que já havia sido descrita na Eq. 20 e agora descrita pela Eq. 66.

$$\eta_o = \rho_c \cdot \alpha_{ab} \cdot \tau \cdot \gamma \quad (66)$$

Onde,

α_{ab} é a absorvidade do absorvedor

ρ_c é a refletividade do primário e secundário

τ é a transmissividade da envoltória do absorvedor

A concentração efetiva é obtida por meio do produto da eficiência óptica (η_0) pela concentração geométrica com sombra (C_{cs}) (Eq. 67).

$$C_{eff} = \eta_0 C_{cs} = \eta_0 \frac{(r_p - r_s)}{\pi R_{abs}} \quad (67)$$

Os parâmetros α , ρ e τ dependem do material em que os espelhos refletores e o absorvedor são confeccionados. Já o fator de interceptação (γ) depende da geometria de construção do concentrador. Assim, o texto considerara como sendo unitárias a absorvidade (do absorvedor) (α_{ab}), refletividade (tanto do primário quanto do secundário) (ρ_c) e a transmissividade (τ) (do envelope que contém o absorvedor) para o cálculo da concentração efetiva. Equivalentemente, será considerado apenas o fator de interceptação (γ) para o cálculo da concentração efetiva, visto que este sim é uma característica que varia com a geometria de construção do concentrador.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos por meio da metodologia aplicada para obtenção dos concentradores aplanáticos tipo elíptico e tipo hiperbólico mais adequados para aplicações de concentração solar térmica. Baseados na metodologia analítica proposta, desde a escolha dos aplanáticos elegíveis para concentração solar, até parâmetros como raio de absorvedor e fatores que influenciam a concentração a ser obtida são analisados e os resultados apresentados. Neste capítulo, também são apresentados os resultados obtidos com simuladores e traçadores de raios. As diferenças das abordagens de ambos os métodos serão apresentadas e os resultados obtidos com a metodologia analítica e por traçador de raios serão comparados e as diferenças analisadas.

5.1 RESULTADOS DO APLANÁTICO POR MEIO DA METODOLOGIA ANALÍTICA

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos ao se realizar a metodologia analítica de cálculo para definição dos aplanáticos mais adequados para a concentração solar térmica, baseando-se na faixa ângulos de borda inicialmente delimitados, e obtendo a concentração geométrica com e sem sombra. Em seguida, são apresentados os raios de absorvedor, eficiência óptica e concentração efetiva obtidos considerando-se as reflexões ocorridas tanto no primário, quanto no secundário dos aplanáticos tipo elíptico e hiperbólico.

5.1.1 Aplanáticos mais adequados considerando (α (φ)) ângulo de borda

Conforme apresentado no capítulo de metodologia, a etapa inicial é a identificação da melhor faixa de aplanáticos a ser analisada para uso em aplicações de concentração solar térmica. Os parâmetros adimensionais s e K , que definem um aplanático, foram variados de modo a identificar aqueles que fornecem maior concentração geométrica, mediante a condição que o ângulo de borda varie de 50° a 65° . Tal condição visa fornecer uma boa relação entre altura do absorvedor e dimensões de primário, e secundário, restringindo o universo de aplanáticos a serem analisados. Assim como ocorre em concentradores do tipo Fresnel (OLIVEIRA, 2014), (CANAVARRO, 2010), a intenção em limitar o ângulo de borda $\alpha(\varphi)$ do aplanático se dá visando maior compacidade da estrutura.

5.1.1.1 Aplanáticos Elípticos ($s < 0$ e $K < 0$)

Para o aplanático elíptico, os valores de s e K , apresentam valores negativos. Assim, foi analisada a família de aplanáticos elípticos, ao se excursionar os parâmetros $-1,55 < s < -0,55$ e $-0,5 < K < -0,05$, mantendo o $NA < 0,94$, ou equivalentemente $\varphi_{\max} = 71^\circ$. O aplanático tipo elíptico teve abertura numérica fixada em $0,94$ para garantir que toda a família de aplanáticos elípticos apresente raios de absorvedor que respeitem o $R_{\text{abs_min}}$ que para $\theta_T = 9\text{mrad}$ vale $0,002865\text{m}$. Os aplanáticos elípticos, diante desses condicionantes que apresentaram maior concentração encontram-se apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Relação de aplanáticos elípticos com melhor relação de concentração geométrica com e sem sombra para θ_T de 9mrad

s	K	Concentração Geométrica (sóis)	$R_{\text{abs}}=R_{\text{il}}$	α (φ) (radianos)	α (φ) (graus)	Concentração Geométrica com sombra (sóis)	Fator de sombra (%)
-0,9	-0,1	80,05	0,00339	1,08	61,89	72,18	9,84
-0,95	-0,1	79,14	0,00342	1,03	59,21	71,21	10,02
-0,85	-0,05	74,08	0,00386	1,07	61,54	70,44	4,91
-1,05	-0,15	78,51	0,00324	1,00	57,31	66,52	15,28
-0,95	-0,15	77,85	0,00329	1,09	62,22	66,35	14,77
-1,05	-0,2	74,69	0,00322	1,05	60,10	59,72	20,04
-1,05	-0,25	72,56	0,00312	1,10	62,82	54,67	24,65
-1,15	-0,25	71,88	0,00312	1,02	58,33	53,60	25,42

Fonte: o autor

Na Tabela 2 podem-se visualizar concentrações geométricas com sombra com maior diferença de acordo com os parâmetros s e K , que as apresentadas no aplanático hiperbólico a serem observados na seção seguinte. Deve-se destacar é que a concentração com sombra no aplanático elíptico é menor para esse $NA=0,94$, que para o aplanático hiperbólico. Outro fator a ser considerado e que irá afetar a concentração efetiva do conjunto é o fator de sombra. Há casos em que o fator de sombra que o secundário faz sobre o primário chega a 25%, ou seja, um quarto do primário não chega a ser atingido pelo sol por estar abaixo do secundário, o que é indesejável por reduzir a concentração efetiva e impor perda de área efetiva de concentração.

5.1.1.2 Aplanáticos Hiperbólicos ($s > 0$ e $K > 0$)

Para valores positivos de s e K , foi analisada a família de aplanáticos tipo hiperbólicos, assim como fora feito na seção anterior com aplanáticos tipo elípticos, considerando-se os parâmetros $0,45 < s < 1,7$ e $0,01 < K < 0,45$, mantendo-se $NA = 0,94$, ou equivalentemente $\varphi_{\max} = 71^\circ$. A abertura numérica (NA) foi fixada em $0,94$ para garantir que toda a família de aplanáticos hiperbólicos apresente raios de absorvedor que respeitem o $R_{\text{abs_min}}$ que para $\theta_T = 9\text{mrad}$ vale $2,865\text{mm}$. Os aplanáticos do tipo hiperbólico de maior concentração com sombra encontram-se apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Relação de aplanáticos tipo hiperbólico com melhor relação de concentração geométrica com e sem sombra para θ_T de 9mrad

S	K	Concentração Geométrica (sóis)	$R_{\text{abs}} = R_{\text{il}}$	α (φ) (radianos)	α (φ) (graus)	Concentração Geométrica com sombra (sóis)	Fator de sombra (%)
0,75	0,03	86,62	0,00316	1,07	61,70	78,76	9,08
0,80	0,03	85,83	0,00320	1,02	58,53	78,49	8,56
0,75	0,02	84,59	0,00334	1,09	62,63	78,47	6,14
0,80	0,02	83,09	0,00341	1,03	59,42	78,30	5,78
0,80	0,03	85,09	0,00328	1,02	58,98	78,05	7,18
0,80	0,04	85,68	0,00316	1,01	58,09	77,18	9,93
0,75	0,04	86,20	0,00312	1,06	61,24	77,14	10,52
0,75	0,03	86,18	0,00322	1,08	62,17	76,79	7,62
0,80	0,04	85,82	0,00311	1,00	57,64	76,14	11,28
0,75	0,04	85,75	0,00309	1,06	60,77	75,52	11,94
0,80	0,02	78,17	0,00368	1,04	59,86	74,77	4,36
0,75	0,04	85,52	0,00306	1,05	60,39	74,35	13,06

Fonte: o autor

Como pode-se observar, mesmo realizando grande variação de valores de parâmetros s e K , há uma faixa de valores de parâmetros que fornecem concentrações geométricas com sombra (C_{cs}) muito próximas entre si (variação entre 74 e 79 sóis) e de valores bastante elevados comparados com o concentrador cilindro-parábola por exemplo que fornece concentrações geométricas que chegam a 30 sóis (RABL; BENDT, 1982), contudo cumpre ressaltar que o concentrador cilindro-parábola apresenta apenas uma reflexão e não duas como ocorre nos aplanáticos. Deve-se observar que o após escolhido o aplanático, será excursionado o φ até que

o raio da região iluminada (R_{il}) seja igual ao raio de absorvedor mínimo (R_{abs_min}), respeitando o limite de concentração do aplanático. Assim, deve-se escolher o raio do absorvedor (R_{abs}) com igual dimensão a do raio da região iluminada (R_{il}).

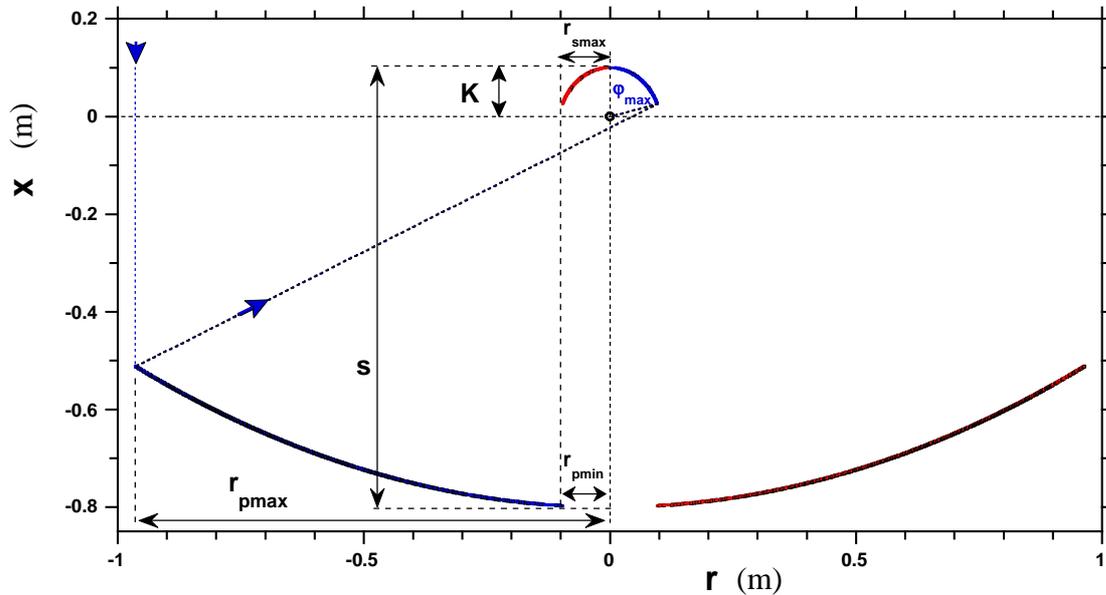
5.1.2 Aplanático Elíptico: raio mínimo, função aceitação, fator de interceptação e concentração efetiva

Para dimensionamento do raio do absorvedor do aplanático a ser escolhido, este deve-se respeitar o limite de concentração do aplanático, que impõe um raio mínimo de acordo com semiângulo solar já com os erros totais (θ_T) considerado. Tendo feito as escolhas dos aplanáticos com maior concentração na seção anterior, deve-se determinar o valor da concentração alcançada por esses aplanáticos ajustando a este limite e não mais para um valor fixo para todos os aplanáticos ($NA=0,94$).

Para o caso específico do aplanático tipo elíptico de parâmetros $s=-0,9$ e $K=-0,1$ (aplanático elíptico de maior concentração com sombra) utilizando a metodologia apresentada no capítulo anterior e respeitando o limite de concentração do aplanático, obteve-se para $\varphi_{max}=74,6^\circ$ uma abertura numérica de 0,9641, ou equivalentemente, o que proporciona o um raio de iluminação (R_{il}) igual ao raio de absorvedor mínimo (R_{abs_min}), que equivale a 2,865mm para o θ_T de 9mrad.

O aplanático tipo elíptico construído com os parâmetros $s=-0,9$, $K=-0,1$ e $\varphi_{max}=74,6^\circ$ é apresentado na Figura 33. É importante observar que a concavidade do espelho secundário é voltada para baixo, o que em um sistema de aquecimento de fluido térmico que flui pelo absorvedor, torna-se uma característica positiva por proteger o absorvedor de vento que aumenta a troca de calor por radiação e convecção. A Figura 33 foi obtida por meio de software, cujo fluxograma do programa fonte encontra-se no Apêndice A.

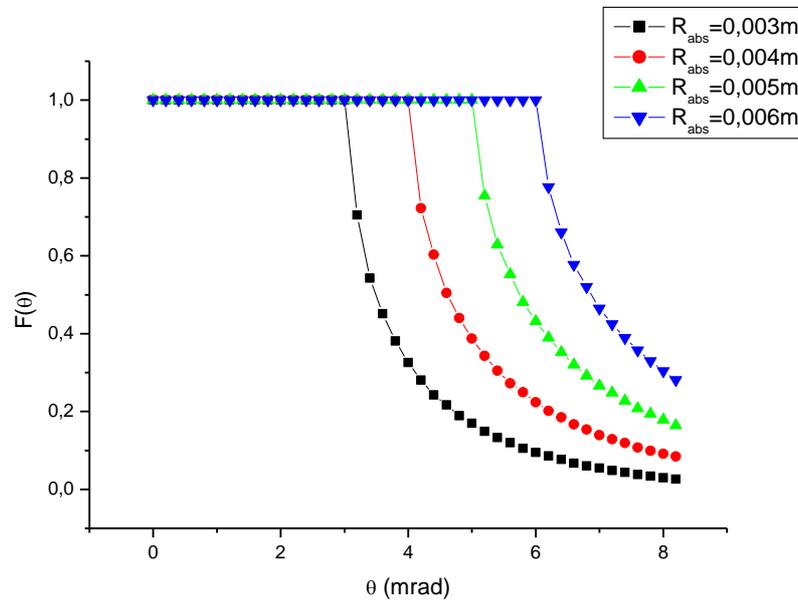
Figura 33 – Aplanático tipo elíptico parâmetros $s=-0,9$, $K=-0,1$ e com $NA=0,9641$ e $R_{abs_min}=2,865mm$



Fonte: o autor

Ao se escolher diversos raios de absorvedor para esse aplanático, pode-se observar o comportamento da função de aceitação angular $F(\theta)$ vs θ , conforme indicado na Figura 34. Ao se aumentar o raio de absorvedor, o valor da função de aceitação angular cresce, indicando que uma maior quantidade de raios, provenientes do coletor, atingem o absorvedor. Esse resultado era esperado, visto que ao escolher um raio do absorvedor R_{abs} maior, uma parte maior da região circular iluminada pela dupla reflexão de raio R_{il} estará contida no absorvedor.

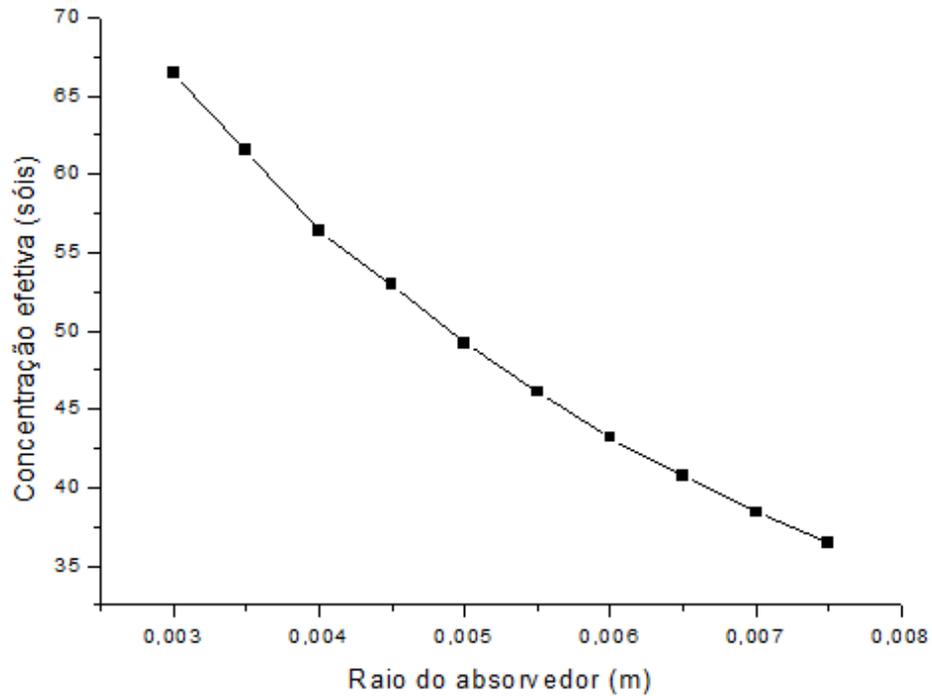
Figura 34 - $F(\theta)$ vs θ para aplanático elíptico $s=-0,9$, $K=-0,1$ e $NA=0,9641$



Fonte: o autor

O produto do fator de interceptação total (γ_T) pela concentração com sombra (C_{CS}), considerando ambos os casos de toque no absorvedor com 1 reflexão (γ_{1R}) e 2 reflexões (γ_{2R}), mantendo-se fixo o semiângulo com os erros totais (θ_T) em 9mrad, de forma que para esse aplanático elíptico, foi obtida a relação da concentração efetiva ou $C_{CS} \cdot \gamma_T$ vs R_{abs} . Tal relação é apresentada na Figura 35. Por meio dessa figura, é possível constatar que a concentração efetiva eleva-se à medida em que o raio do absorvedor reduz-se, chegando a valores superiores a 65 sóis de concentração efetiva para raio de absorvedor de 0,003m.

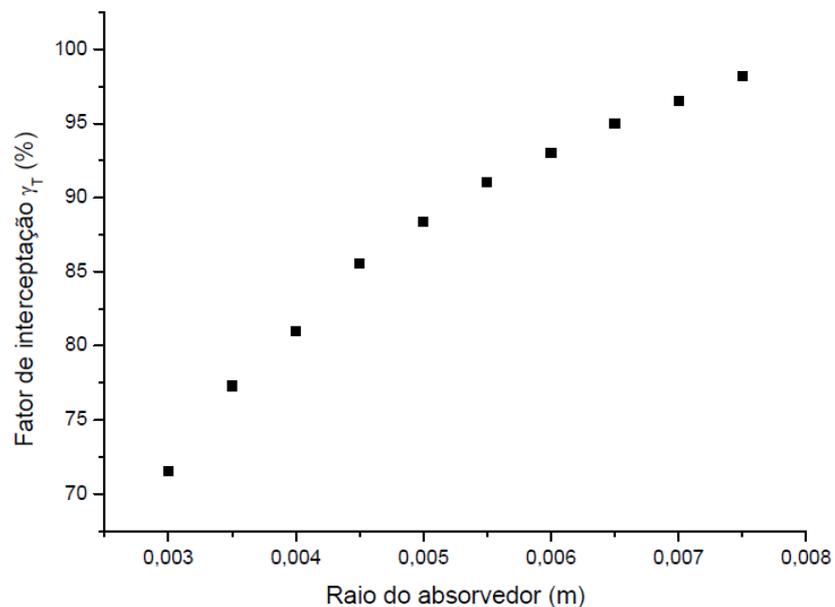
Figura 35 - Gráfico da concentração efetiva vs raio do absorvedor para aplanático $s=-0,9$, $K=-0,1$ e $\varphi_{\max}=0,9641$, $\theta_T=9\text{mrad}$



Fonte: o autor

Uma outra relação importante para a análise do aplanático elíptico é quanto ao comportamento do fator de interceptação total ao se variar o diâmetro do absorvedor, mantendo-se os demais parâmetros fixos. A Figura 36 apresenta tal relação.

Figura 36 - Gráfico do fator de interceptação vs raio do absorvedor para aplanático elíptico

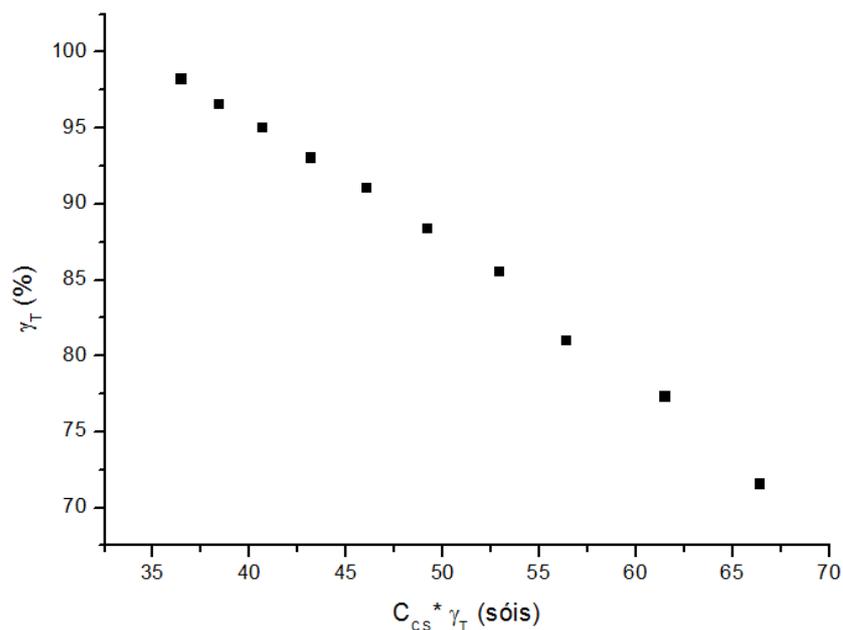


Fonte: o autor

Como pode-se observar, à medida em que o raio do absorvedor cresce, o fator de interceptação total também cresce, comportamento esperado, visto que uma maior quantidade de radiação será coletada pelo absorvedor. Contudo a concentração geométrica reduz-se, visto que ela depende fundamentalmente de uma relação de dimensões entre a superfície coletora, mantida constante, e a região absorvedora da radiação que está crescendo (Figura 36).

A Figura 37 apresenta o comportamento do fator de interceptação total em função da concentração efetiva. É importante notar que está sendo considerado para a concentração efetiva o produto da concentração com sombra pelo fator de interceptação total, considerando-se 1 a absorvidade (α_{ab}), a transmitividade (τ) e a refletividade do concentrador (ρ_c), visto que tais coeficientes dependem da propriedade do material em que são confeccionados e não da geometria do sistema proposto.

Figura 37 - Gráfico do fator de interceptação total vs a concentração efetiva para o aplanático elíptico



Fonte: o autor

Pode-se observar por meio do gráfico da Figura 37 que a concentração efetiva para o aplanático elíptico chega a valores próximos a 67 sóis a um fator de interceptação total da ordem de 71,5% utilizando-se um absorvedor de raio 0,003m. Caso deseje obter um fator de interceptação total de 95%, chega-se a uma concentração efetiva de 40 sóis, utilizando-se um raio de absorvedor de 0,0065m. Como observado anteriormente, o fator de interceptação menor está relacionado a um raio de absorvedor menor, o que indica que a máxima concentração

efetiva é obtida com a menor fator de interceptação. Assim, pode-se ajustar a concentração obtida de acordo com o raio do absorvedor comercialmente disponível ou fator de interceptação desejado.

Após analisar o comportamento de raio de absorvedor, concentração com sombra (C_{CS}) e por meio da metodologia aplicada identificar os respectivos valores de fator de interceptação para os feixes que atingem o absorvedor imediatamente após a primeira reflexão no primário (γ_{1R}) e para os feixes que atingem o absorvedor imediatamente após a segunda reflexão (γ_{2R}), é possível obter a concentração efetiva total que é determinada pelo produto da concentração com sombra pela soma dos fatores de interceptação ($\gamma_{1R} + \gamma_{2R}$) que é indicado pela última coluna da Tabela 4.

Tabela 4 - Modelo Analítico para o aplanático elíptico $s=-0,9$, $K=-0,1$, $NA=0,9641$, $\theta_T=9\text{mrad}$

Modelo analítico - Aplanático Elíptico					
$R_{abs}(m)$	C_{CS}	γ_{1R}	γ_{2R}	$\gamma_{1R}+\gamma_{2R}$	$C_{CS} \cdot (\gamma_{1R}+\gamma_{2R})$
0,0030	92,83	29,66%	41,88%	71,54%	66,42
0,0035	79,57	33,71%	43,58%	77,30%	61,51
0,0040	69,62	37,60%	43,38%	80,98%	56,39
0,0045	61,89	41,32%	44,22%	85,54%	52,95
0,0050	55,70	44,88%	43,48%	88,36%	49,22
0,0055	50,64	48,33%	42,69%	91,02%	46,09
0,0060	46,42	51,72%	41,31%	93,02%	43,18
0,0065	42,85	55,05%	39,93%	94,98%	40,70
0,0070	39,79	58,36%	38,19%	96,55%	38,42
0,0075	37,13	61,59%	36,63%	98,22%	36,63

Fonte: o autor

Pode-se observar por meio da Tabela 4, que a máxima concentração efetiva é obtida para o menor raio de absorvedor que é de 0,003m, chegando ao valor de 66,42 sóis para um fator de interceptação total (γ_T) de 0,7154 (71,54%).

Ao se utilizar raios de absorvedores maiores, naturalmente o fator de interceptação total aumenta, contudo a concentração efetiva fica menor, como por exemplo para o caso da escolha de um raio de absorvedor de 0,006m que apresenta um fator de interceptação total de 93,02%, contudo a concentração efetiva é de 43,18 sóis.

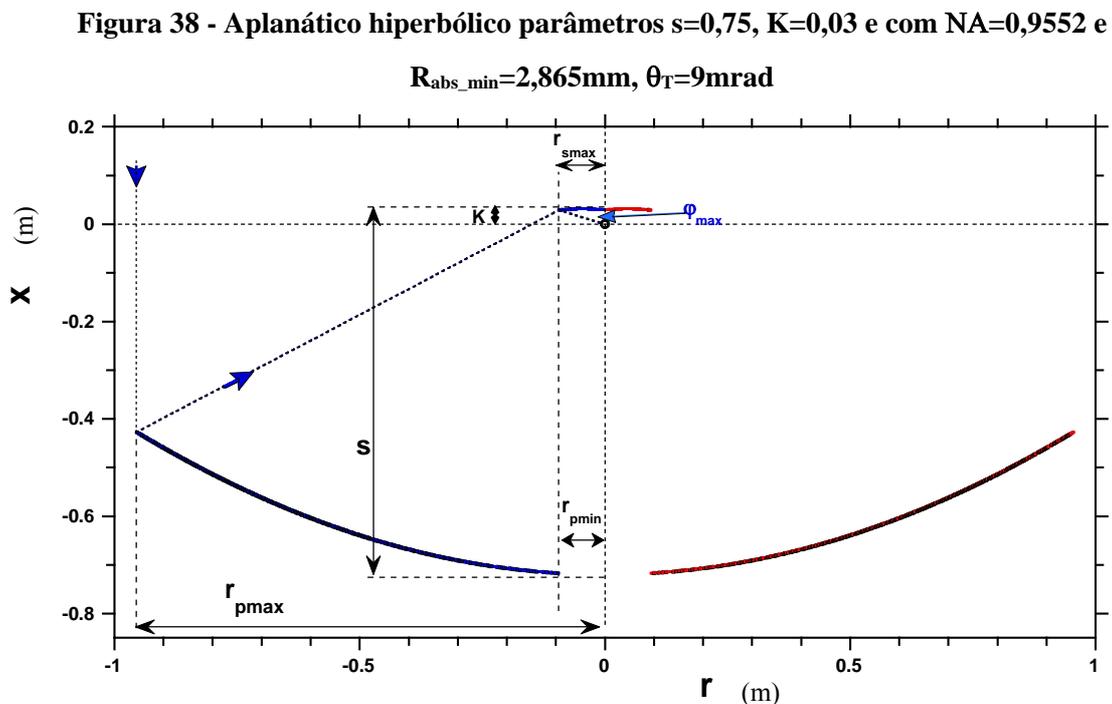
Ao se analisar a Tabela 4, também é possível analisar o comportamento do fator de interceptação para a primeira reflexão (γ_{1R}) que é monotonicamente crescente à medida em que se aumenta o raio do absorvedor, saindo de um valor de 29,66% para o raio de absorvedor de

0,003m para 61,59% para o raio de absorvedor de 0,0075m. Já o fator de interceptação após a segunda reflexão (γ_{2R}) não apresenta esse comportamento, visto que antes de chegarem ao secundário, os feixes de radiação já são absorvidos, o que faz com que γ_{2R} não tenha um comportamento monotonicamente crescente. Contudo, o fator de interceptação total é sempre crescente ao se ampliar o raio de absorvedor.

5.1.3 Aplanático Hiperbólico: raio mínimo, função aceitação, fator de interceptação e concentração efetiva

Nesta seção, são apresentados os parâmetros obtidos para o aplanático hiperbólico por meio das metodologias de cálculo analítico apresentadas, similarmente ao apresentado na seção anterior para o aplanático elíptico.

O aplanático hiperbólico tem a estrutura apresentada na Figura 38, ao se realizar a variação de ϕ de forma respeitar o limite de concentração do aplanático, $R_{abs_min}=2,865\text{mm}$, foram obtidos os resultados seguintes: $\phi_{max}=72,8^\circ$ ou $NA=0,9552$. Ao se comparar a abertura numérica (NA), esta obtida para o aplanático hiperbólico é ligeiramente menor em relação ao aplanático elíptico analisado.

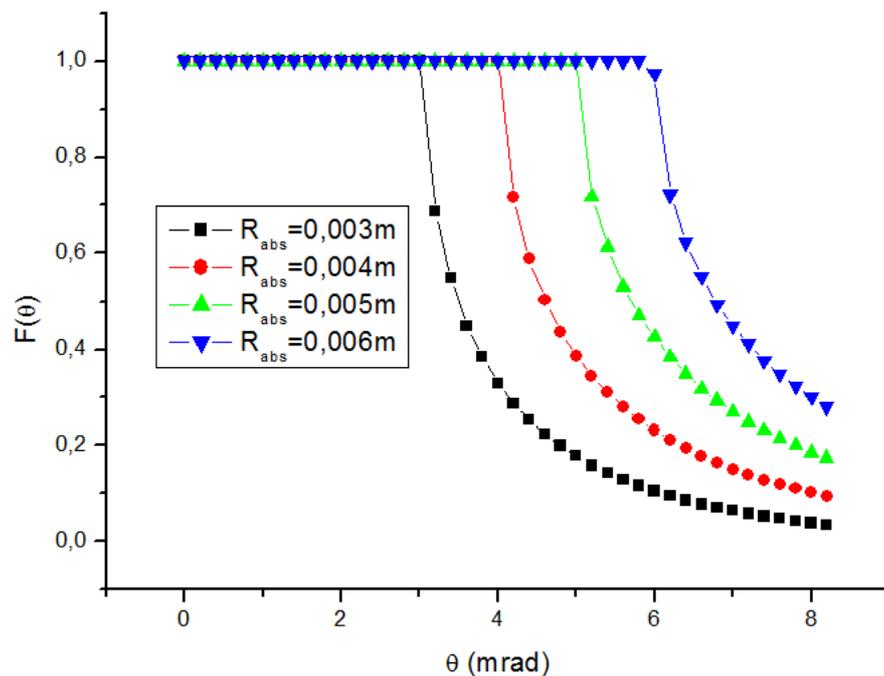


Fonte: o autor

Na Figura 38, o secundário do aplanático não apresenta um concavidade monotonicamente voltada para baixo como é o caso do aplanático elíptico, o que acaba permitindo uma maior troca de calor do absorvedor com o meio.

A Figura 39 apresenta o resultado da função aceitação angular obtida para o aplanático hiperbólico para diferentes raios de absorvedor escolhidos. Nota-se o comportamento similar da função de aceitação em ambos os aplanáticos, de forma que ao se aumentar o raio do absorvedor, aumenta-se também a função aceitação angular.

Figura 39 - $F(\theta)$ vs θ para aplanático $s=0,75$, $K=0,03$ e $NA=0,9552$

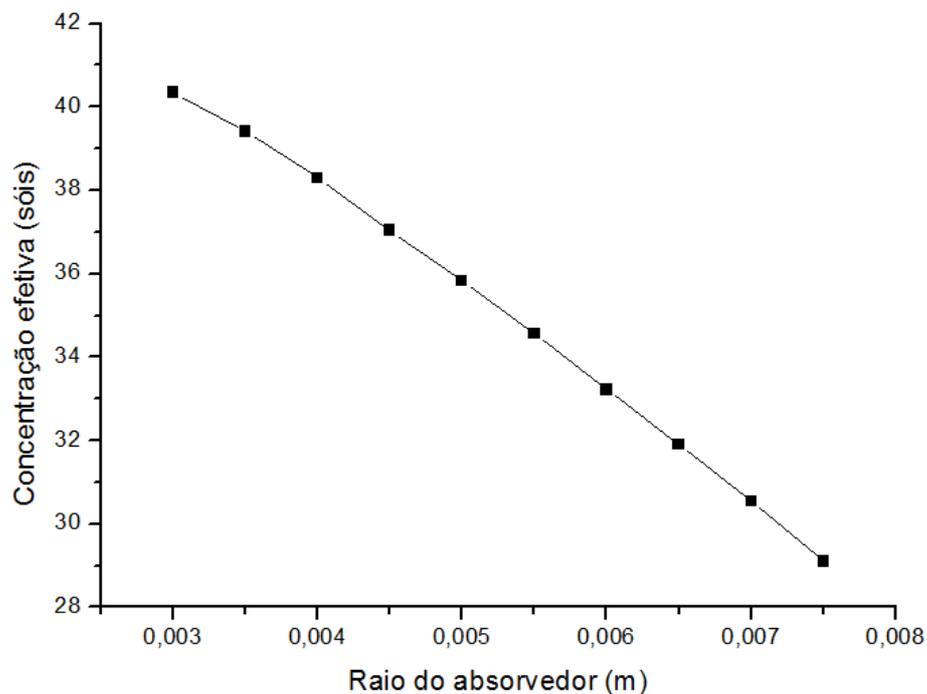


Fonte: o autor

A Figura 40 indica a relação entre o produto fator de interceptação total pela concentração geométrica com sombra versus o raio do absorvedor do aplanático hiperbólico. Assim como disposto na seção anterior, a concentração efetiva considerará a absorvidade (α_{ab}), a transmitividade (τ) e a refletividade (ρ_c) iguais à unidade, de forma que o produto C_{cs} por γ_T será denominado concentração efetiva. Ao se observar a Figura 40, pode-se observar que a concentração efetiva que atinge o absorvedor é menor para o aplanático hiperbólico que para o aplanático elíptico. O produto C_{cs} por γ_T do aplanático elíptico de $s=-0,9$, $K=-0,1$ e $NA=0,9641$ é 66,42 sóis para um raio de absorvedor de 0,003m. Já para o para o aplanático hiperbólico de $s=0,75$, $K=0,03$ e $NA=0,9552$, com o absorvedor de mesmo raio, o produto C_{cs} por γ_T vale 40,35 sóis, que pode ser verificado por meio da Figura 40.

Isso denota que para ambas as configurações de aplanáticos, chega-se a concentrações efetivas superiores às de um concentrador cilindro parábola que é de 23 sóis (RABL; BENDT, 1982), o concentrador aplanático elíptico apresenta uma concentração bem superior àquela do hiperbólico, chegando a concentrações maiores que 2,87 vezes às concentrações do cilindro parábola para $R_{abs}=3\text{mm}$. O principal fator para essa superioridade do aplanático tipo elíptico é o fator de interceptação ser maior que o do tipo hiperbólico em função de os feixes de radiação cruzarem o eixo vertical do aplanático, levando a um fator de interceptação superior na primeira reflexão no primário (γ_{1R}).

Figura 40- Gráfico da concentração efetiva vs raio do absorvedor para aplanático $s=0,75$, $K=0,03$ e com $NA=0,9552$, $\theta_1=9\text{mrad}$



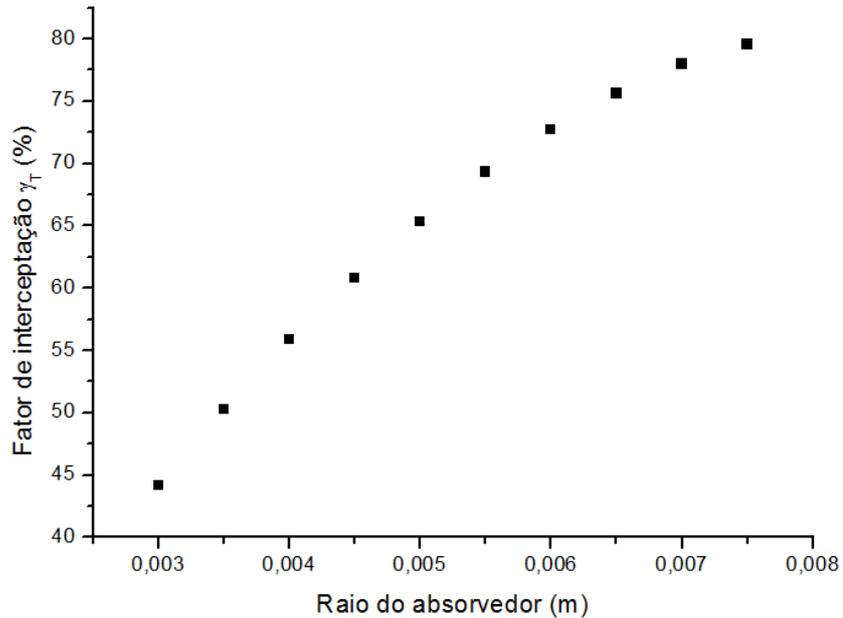
Fonte: o autor

É importante ressaltar que tanto para o aplanático elíptico (Figura 35), quanto para o hiperbólico (Figura 40), ao se aumentar o raio do absorvedor, a concentração efetiva que atinge o absorvedor diminui. Assim, observa-se que para se maximizar a concentração, deve-se reduzir o raio do absorvedor até o raio mínimo que atenda ao de concentração do aplanático que impõe um raio mínimo de 2,865mm.

O comportamento do fator de interceptação para esse aplanático hiperbólico é apresentado na Figura 41. Tal gráfico é similar ao obtido para o aplanático elíptico, contudo

atinge-se níveis de fator de interceptação bem inferiores com o hiperbólico para raios de absorvedor similares.

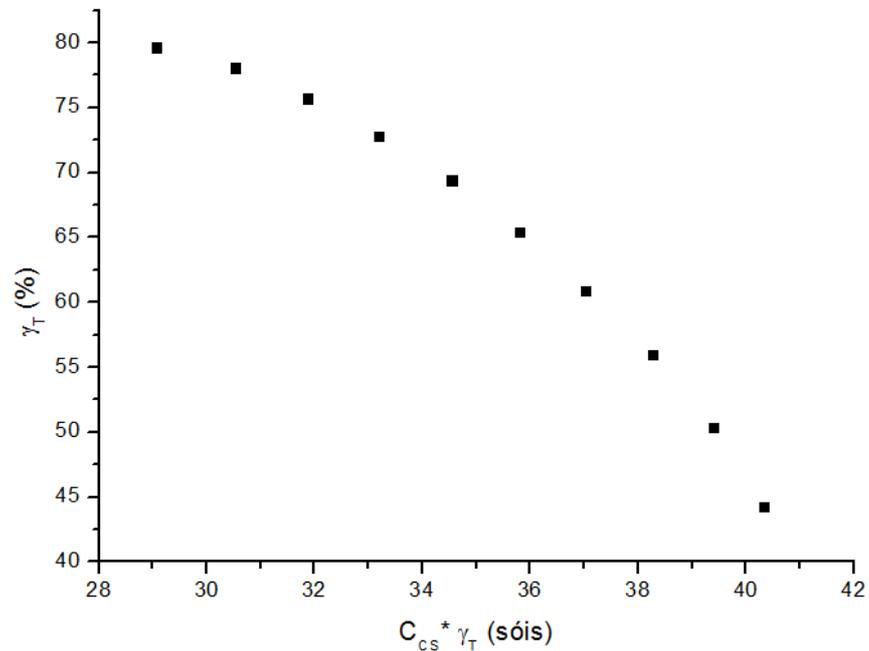
Figura 41 - Gráfico do fator de interceptação total vs raio do absorvedor para aplanático hiperbólico



Fonte: o autor

Pode-se observar por meio da Figura 42 que a concentração efetiva (é o produto de C_{cs} por γ_T) obtida varia inversamente com γ_T . Assim, para uma concentração efetiva pouco acima de 40 sóis, têm-se um fator de interceptação inferior a 45%, aumentando-se o fator de interceptação para um raio maior de absorvedor adotado, reduz-se a concentração efetiva do conjunto ótico.

Figura 42 - Gráfico fator de interceptação total vs concentração efetiva para aplanático hiperbólico



Fonte: o autor

Similarmente ao realizado para o aplanático elíptico, no aplanático hiperbólico foi disposto na Tabela 5 valores de fator de interceptação total e para 1 e 2 reflexões, bem como parâmetros como concentração com sombra.

Tabela 5 - Modelo Analítico para o aplanático hiperbólico $s=0,75$, $K=0,03$, $NA=0,9552$, $\theta_T=9\text{mrad}$

Modelo analítico - Aplanático Hiperbólico					
$R_{\text{abs}}(\text{m})$	C_{CS}	γ_{1R}	γ_{2R}	$\gamma_{1R}+\gamma_{2R}$	$C_{CS} \cdot (\gamma_{1R}+\gamma_{2R})$
0,0030	91,40	0,62%	43,53%	44,15%	40,35
0,0035	78,34	0,83%	49,47%	50,30%	39,41
0,0040	68,55	1,10%	54,76%	55,86%	38,29
0,0045	60,93	1,38%	59,40%	60,79%	37,04
0,0050	54,84	1,71%	63,62%	65,32%	35,82
0,0055	49,85	2,06%	67,26%	69,32%	34,56
0,0060	45,70	2,45%	70,24%	72,69%	33,22
0,0065	42,18	2,87%	72,77%	75,63%	31,90
0,0070	39,17	3,32%	74,67%	77,99%	30,55
0,0075	36,56	3,81%	75,75%	79,56%	29,09

Fonte: o autor

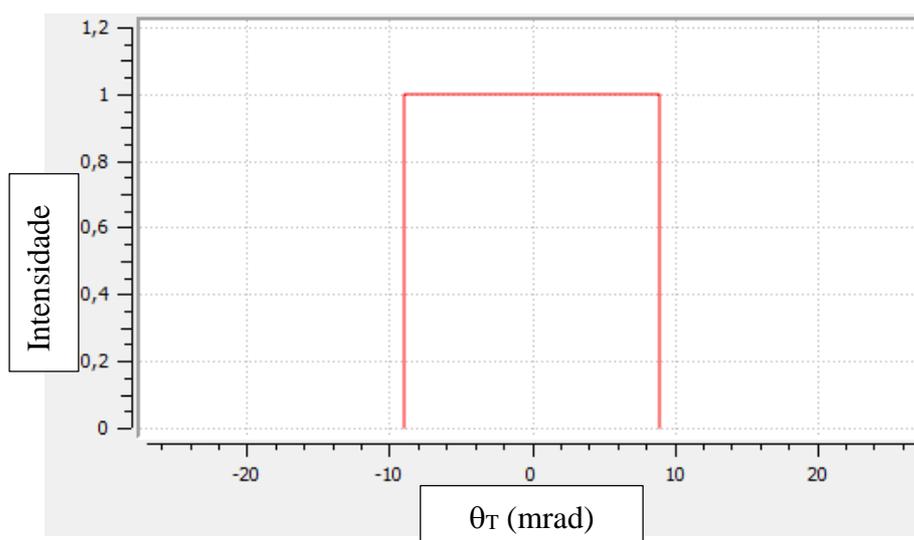
Assim, pode-se observar por meio da Tabela 5 que a máxima concentração efetiva é obtida para o raio mínimo, chegando ao valor de 40,35 sóis para um fator de interceptação total (γ_T) de 0,4415 (44,15%).

5.2 RESULTADOS DO APLANÁTICO POR MEIO DE SIMULAÇÃO COM TRAÇAMENTO DE RAIOS

5.2.1 Simulação Aplanático Elíptico

Os aplanáticos apresentados na seção anterior, cujos resultados foram calculados utilizando-se a metodologia analítica proposta, também foram simulados utilizando software de traçamento de raios, apresentando resultados bastante próximos aos obtidos de forma analítica. Para o cálculo por meio de traçamento de raios foram definidos os seguintes parâmetros: forma do sol adotada – pillbox 9mrad, ou seja, foi adotada que a distribuição de radiação solar como sendo uma função retângulo de 9mrad, tal função apresenta-se como o brilho efetivo do sol como sendo uma função retângulo concentrada de -9mrad a +9mrad, valendo 1, fora dessa região, o brilho efetivo do sol vale 0 (Figura 43).

Figura 43 - Distribuição de radiação solar adotada para cálculo do fator de interceptação por meio de programa traçador de raios

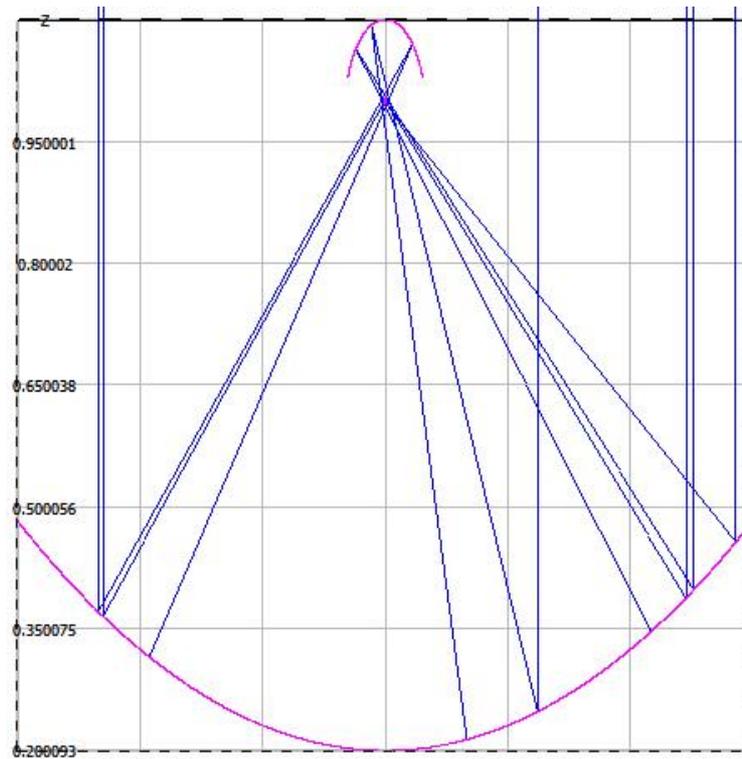


Fonte: o autor

As dimensões do aplanático elíptico calculadas analiticamente foram exportadas para o traçador de raios (Figura 44) e os raios foram simulados conforme a distribuição de raios

ilustrada numa quantidade de 100.000 raios distribuídos conforme a distribuição normal de -9mrad a $+9\text{mrad}$, tendo sido contabilizados os raios que atingem o primário, o secundário e o absorvedor.

Figura 44 - Distribuição de raios simulados no Soltrace do aplanático elíptico $s=-0,9$, $K=-0,1$ e $NA=0,9641$, $\theta_T=9\text{mrad}$, $R_{\text{abs}}=0,003\text{m}$



Fonte: o autor

O procedimento para cálculo da concentração por meio da simulação foi o seguinte: dimensionando o primário r_p , definindo o raio do absorvedor, tendo como consequência a obtenção da concentração geométrica com sombra, foram contabilizados os raios que atingiram o absorvedor após tocarem a primeira vez no primário, por meio de análise de cada raio simulado no traçador de raios que toca no primário e atinge de forma direta o absorvedor. Sendo esta situação foi denominada γ_{1R} . Foram contabilizados também os raios que tocaram uma única vez no primário e, em seguida tocaram no secundário, vindo a atingir o absorvedor para cada um dos raios definidos. A essa situação, denominou-se γ_{2R} . Ambos os modos foram calculados e os resultados do aplanático elíptico estão apresentados na Tabela 6 a seguir.

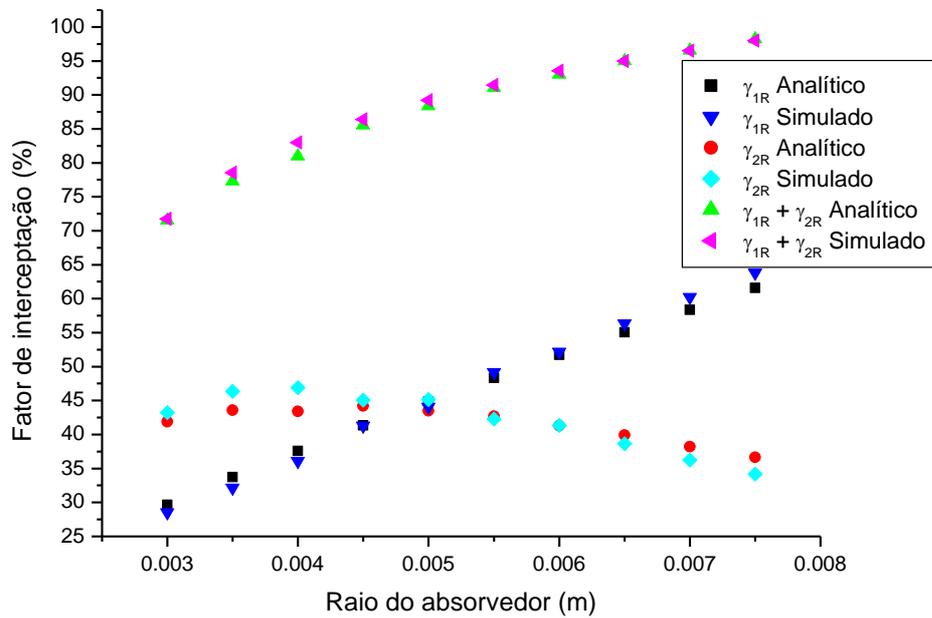
Tabela 6 - Simulação do aplanático elíptico ($s=-0,9$, $K=-0,1$ e $NA=0,9641$) utilizando-se programa traçador de raios com $\theta_T=9\text{mrad}$

Aplanático Elíptico - Simulação					
$R_{\text{abs}}(\text{m})$	C_{CS}	γ_{1R}	γ_{2R}	$\gamma_{1R} + \gamma_{2R}$	$C_{\text{CS}} \cdot (\gamma_{1R} + \gamma_{2R})$
0,0030	92,83	28,54%	43,20%	71,74%	66,59
0,0035	79,57	32,18%	46,37%	78,55%	62,50
0,0040	69,62	36,09%	46,88%	82,97%	57,77
0,0045	61,89	41,31%	45,06%	86,38%	53,46
0,0050	55,70	44,07%	45,13%	89,20%	49,68
0,0055	50,64	49,16%	42,28%	91,45%	46,31
0,0060	46,42	52,19%	41,35%	93,54%	43,42
0,0065	42,85	56,34%	38,66%	95,00%	40,70
0,0070	39,79	60,24%	36,25%	96,48%	38,39
0,0075	37,13	63,81%	34,16%	97,97%	36,38

Fonte: o autor

Como pode-se observar na Tabela 6, com o raio do absorvedor definido para o raio que atenda ao limite do concentrador aplanático $R_{\text{abs}}=0,003\text{m}$, 28,54% de todos os raios simulados tocam no absorvedor com apenas uma reflexão e 43,30% dos raios tocam o absorvedor com 2 reflexões. Assim, o fator de interceptação total (γ_T) para essa situação é de 71,74%, o que leva a uma concentração efetiva de 66,59 sóis. O fator de interceptação total ($\gamma_T=71,74\%$) simulado é próximo ao resultado obtido por meio do modelo analítico descrito na seção anterior que forneceu ($\gamma_T=71,54\%$). Houve diferenças nos fatores de interceptação com 1 e 2 reflexões, contudo a soma dos fatores de interceptação, que fornece γ_T foi muito próxima independentemente das dimensões do raio do absorvedor escolhido. A representação dos fatores de interceptação obtidos pela proposta analítica e simulado utilizando-se traçador de raios está indicado na Figura 45.

Figura 45 – Fator de interceptação do aplanático elíptico $s=-0,9$, $K=-0,1$ e $NA=0,9641$, $\theta_T=9\text{mrad}$

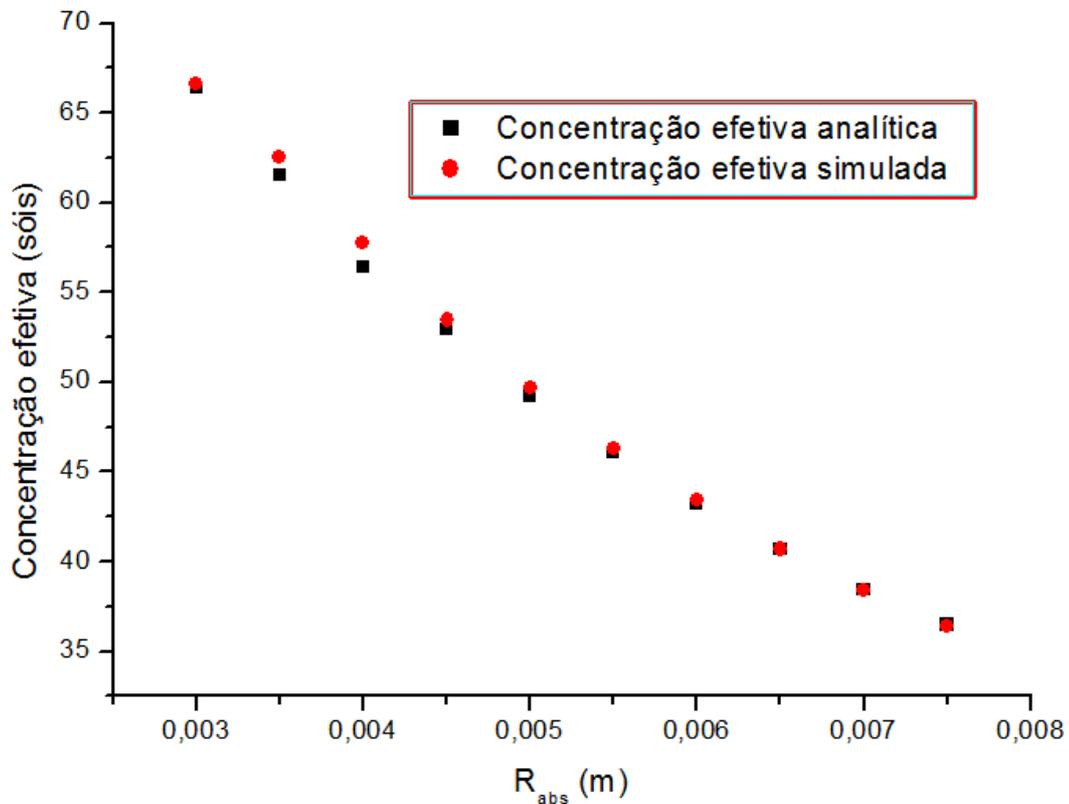


Fonte: o autor

Pode-se observar na Figura 45 que os comportamentos são similares para o fator de interceptação para 1 reflexão é crescente, para 2 reflexões o fator de interceptação mantém-se praticamente estável, de forma que o fator de interceptação total cresce à medida em que o raio do absorvedor cresce.

A Figura 46 indica a concentração efetiva calculada de forma analítica e a calculada por meio de traçador de raios para diferentes raios de absorvedor. Por meio da figura, pode-se observar que em ambas as formas de obtenção da concentração efetiva, os valores obtidos são próximos e reduzem à medida em que escolhe-se raio de absorvedor de dimensão maior.

Figura 46 – Concentração efetiva para aplanático elíptico – resultados obtidos de forma analítica e simulada com traçador de raios

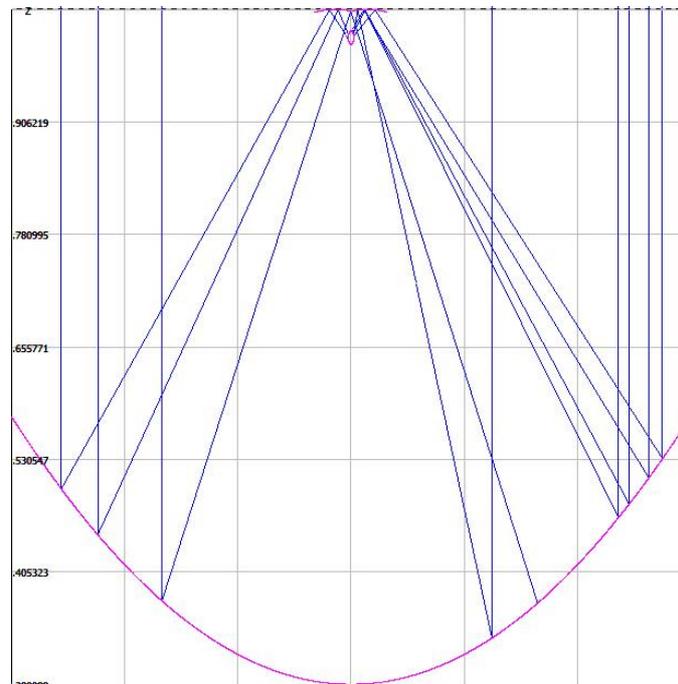


Fonte: o autor

5.2.2 Simulação Aplanático Hiperbólico

Similarmente ao simulado no aplanático elíptico, foi realizada a simulação utilizando-se os mesmos parâmetros do aplanático hiperbólico calculado por meio do método analítico, quais sejam: $s=0,75$, $K=0,03$, $NA=0,9552$. Utilizou-se uma distribuição idêntica àquela utilizada na simulação do aplanático elíptico da seção anterior e foi executada a simulação utilizando-se o traçador de raios (Figura 47).

Figura 47 - Distribuição de raios obtidos por meio do traçador de raios para o aplanático hiperbólico $s=0,75$, $K=0,03$, $NA=0,9552$, $R_{abs}=0,003m$



Fonte: o autor

Os resultados obtidos por meio de simulação utilizando-se o traçador de raios para o aplanático hiperbólico (Tabela 7) foram próximos daqueles obtidos por método analítico, de forma que o fator de interceptação total ($\gamma_T = \gamma_{1R} + \gamma_{2R}$) simulado foi de 42,30% para o $R_{abs}=0,003m$. Já o fator de interceptação total medido para o mesmo raio de forma analítica foi de 44,15%.

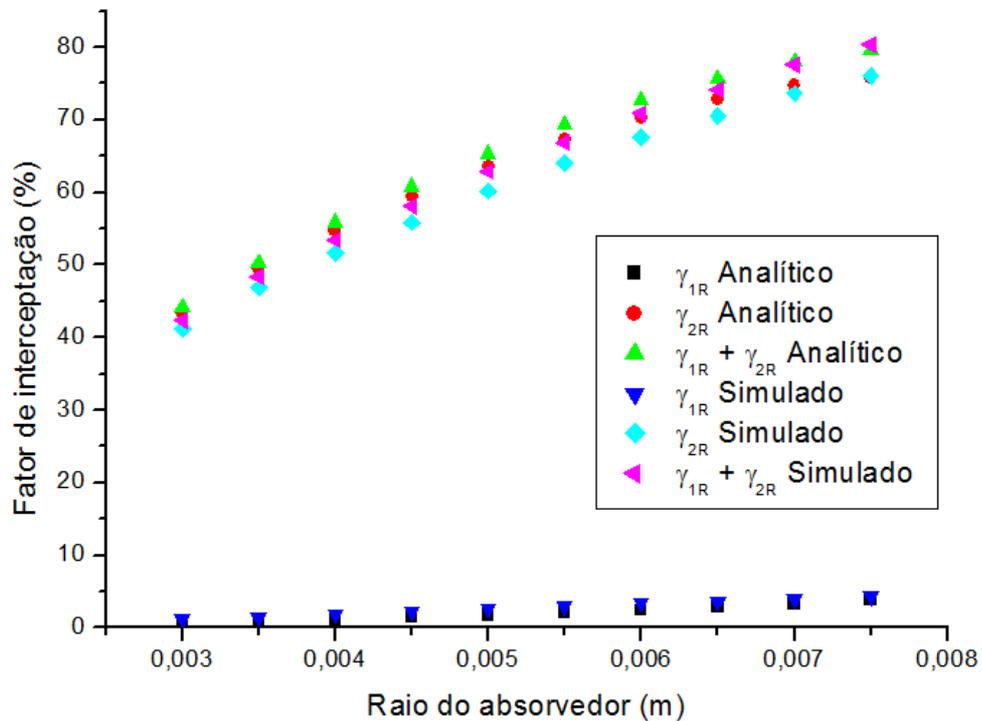
Tabela 7 - Simulação do aplanático hiperbólico ($s=0,75$, $K=0,03$ e $NA=0,9552$) utilizando-se o traçador de raios com $\theta_T=9mrad$

Simulação - Aplanático Hiperbólico					
R_{abs}	C_{cs}	γ_1	γ_2	$\gamma_1 + \gamma_2$	$C_{cs} \cdot (\gamma_{1R} + \gamma_{2R})$
0,00300	92,85	1,17%	41,14%	42,30%	39,28
0,00350	79,58	1,48%	46,84%	48,32%	38,45
0,00400	69,63	1,80%	51,60%	53,40%	37,19
0,00450	61,90	2,19%	55,86%	58,06%	35,94
0,00500	55,71	2,68%	60,19%	62,87%	35,02
0,00550	50,64	2,94%	63,99%	66,93%	33,89
0,00600	46,42	3,34%	67,55%	70,89%	32,91
0,00650	42,85	3,63%	70,52%	74,15%	31,78
0,00700	39,79	3,81%	73,64%	77,45%	30,82
0,00750	37,14	4,29%	76,04%	80,33%	29,83

Fonte: o autor

A Figura 48 indica o comportamento muito próximo dos fatores de interceptação obtidos por simulação e de forma analítica. Pode-se observar que praticamente o fator de absorção total é obtido pelo fator de interceptação após a segunda reflexão (γ_{2R}), visto que praticamente não há absorção após a primeira reflexão no aplanático hiperbólico em função dos raios refletidos não cruzarem o eixo vertical.

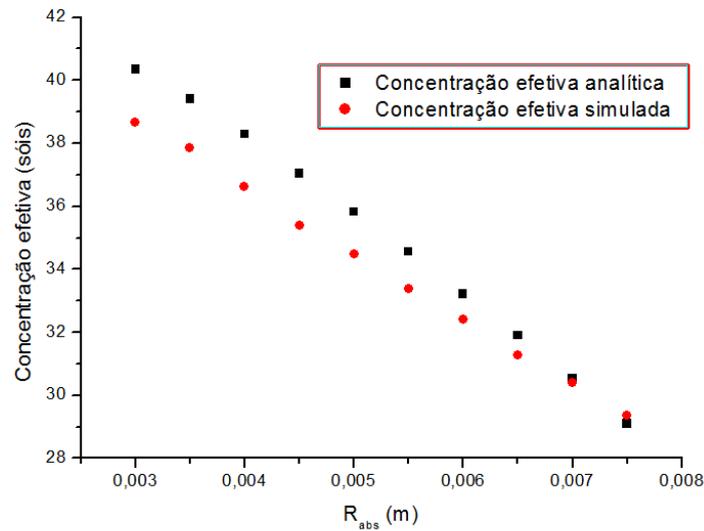
Figura 48 - Fator de interceptação do aplanático hiperbólico $\theta_T=9\text{mrad}$, $s=0,75$, $K=0,03$ e $NA=0,9552$



Fonte: o autor

A Figura 49 indica a concentração efetiva para a proposta analítica e a medida simulada utilizando o traçador de raios para diferentes raios de absorvedor para o aplanático tipo hiperbólico. Pode-se observar que, assim como ocorreu com o aplanático tipo elíptico, a concentração efetiva reduz-se à medida em que escolhe-se raio de absorvedor de dimensão maior.

Figura 49 – Concentração efetiva do aplanático hiperbólico de $\theta_T=9\text{mrad}$, $s=0,75$, $K=0,03$ e $NA=0,9552$



Fonte: o autor

5.2.3 Estimativas de dimensões de um concentrador aplanático elíptico

Diante dos resultados obtidos, cumpre-se dimensionar proporcionalmente a parâmetros comerciais o aplanático elíptico analisado, que mostrou melhor concentração efetiva que o hiperbólico. Sendo os parâmetros $s=-0,9$, $K=-0,1$, $NA=0,9641$, supondo um raio de absorvedor de $0,005\text{m}$, que gera uma concentração efetiva de $49,22$ sóis no modelo analítico e $49,68$ sóis simulado no traçador de raios. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos considerando-se o raio de absorvedor de referência de $0,003\text{m}$, $0,005\text{m}$ e $0,0065\text{m}$ e utilizando a proporcionalidade para se obter as dimensões da estrutura em tamanho real, considerando um absorvedor comercial de raio 20mm ou 2cm .

Tabela 8 - Simulação de dimensões do aplanático elíptico

Dimensões	Aplanático Elíptico ($s=-0,9$, $K=-0,1$, $NA=0,9641$, $\theta_T=9\text{mrad}$)		
	0,003	0,005	0,0065
Raio do absorvedor referência (m)	0,003	0,005	0,0065
Raio do absorvedor comercial (m)	0,02	0,02	0,02
Concentração efetiva (sóis)	66,42	49,22	40,70
Fator de interceptação (%)	71,54	88,36	94,98
Comprimento de 1 lado do primário (m)	7,58	3,9	3
Comprimento de 1 lado do secundário (m)	0,76	0,39	0,30
Altura do secundário ao solo (m)	6,98	3,6	2,76
Altura do absorvedor ao solo (m)	6,20	3,2	2,46

Fonte: o autor

Como pode ser observado por meio da Tabela 8, mediante a escolha do raio do absorvedor de referência, definem-se as dimensões dos espelhos primário e secundário, além de obterem-se a concentração efetiva e fator de interceptação do conjunto óptico. Para o caso da escolha do raio de referência de 6,5mm, a dimensão total do primário é de 6m, tendo o secundário dimensão total de 60cm, levando a uma concentração efetiva de 40,70 sóis e um fator de interceptação de aproximadamente 0,95. Ao se alterar a escolha do raio de referência do absorvedor para 3mm, por exemplo, teremos a dimensão total do primário superior a 15m e com um fator de interceptação de 0,71, o que torne difícil sua implementação. Assim, a escolha do raio do absorvedor de referência pode ser realizada mediante as condições de concentração efetiva e dimensões de primário e secundário desejadas.

6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

Esse trabalho apresenta o aplanático bem como suas características mais importantes para aplicações de concentração solar térmica para ambas as configurações, elíptico ($s < 0$, $K < 0$) e hiperbólico ($s > 0$, $K > 0$). Foram abordados conceitos fundamentais para a concentração como fator de sombra, eficiência óptica, fator de interceptação e função de brilho.

Ao longo dos capítulos, foram apresentadas novas metodologias analíticas para o cálculo da concentração em dispositivos de dupla reflexão como o aplanático que basearam-se no dimensionamento do fator de interceptação tanto para o caso de uma reflexão no primário e em seguida atingindo o absorvedor (γ_{1R}), quanto para o caso de 2 reflexões (γ_{2R}). A metodologia do cálculo de γ_{1R} considerou a razão entre o cone de radiação solar interceptado pelo absorvedor (após a reflexão no primário) e o cone de radiação solar coletado no primário. Já o fator de interceptação após a segunda reflexão (γ_{2R}) foi calculado considerando a convolução do brilho efetivo do sol com a função de aceitação angular que relaciona o raio do absorvedor definido com o aplanático (s , K e ϕ_{\max}). Assim, o fator de interceptação total (γ_T) é obtido pela soma dos dois fatores de interceptação.

O trabalho apresentou o processo de escolha da família de aplanáticos mais adequados para a concentração solar, bem como as premissas adotadas que levavam em consideração o ângulo de borda ($\alpha(\phi)$) e o sol como fonte de radiação com seus erros totais (θ_T) e o limite de concentração do aplanático. Tal restrição impõe um raio de absorvedor mínimo, levando a uma concentração geométrica máxima, reduzindo a eficiência óptica.

Foram analisados diversos mecanismos de perda no aplanático como fator de sombra, função de aceitação angular, fator de interceptação para ambos os aplanáticos hiperbólico e elíptico. Foi analisado o comportamento da região focal de acordo com a variação do ponto em que a radiação solar toca no primário do aplanático (r_p), sendo constatado que o raio da região iluminada (R_{il}), onde ficaria um absorvedor proposto, reduz-se à medida em que r_p cresce.

Foram apresentados os resultados de concentração efetiva e fator de interceptação alcançados tanto no método analítico quanto por meio de simulação utilizando-se os softwares MathCad e Soltrace concatenados para ambos os aplanáticos. Após análise de ambos os aplanáticos, constatou-se que o do tipo elíptico apresentou-se melhor que o do tipo hiperbólico, mas ambos tiveram resultados superiores aos obtidos com uma única reflexão em concentradores cilindro-parábola ou concentradores com secundário.

O aplanático elíptico apresentado chegou a ter uma concentração efetiva obtida pelo de 66,42 sóis com um fator de interceptação total de 71,74% para o caso raio de absorvedor de

0,003m. O aplanático hiperbólico chegou a uma concentração efetiva de 40,35 sóis a um fator de interceptação total de 44,15%, que apesar de inferior ao do elíptico, já é bem superior a um concentrador cilindro-parábola que foi apresentado na revisão de literatura como sendo de 23 sóis.

Ao final, foi apresentado o dimensionamento do aplanático considerando que o absorvedor tenha dimensões comerciais e para tanto foram exemplificados diversos casos de raio de absorvedor para futuras implantações práticas desses conjuntos ópticos de acordo com as dimensões e concentrações requeridas em projetos de concentração solar térmica.

Como perspectivas, propomos substituir o primário do aplanático por um Fresnel, o que provavelmente reduziria um pouco a concentração solar, contudo facilitaria sua implementação por tratarem-se de espelhos planos ou semi-planos em seu primário. Já que o secundário tem dimensões bem menores que as do primário, ele seria mantido, substituindo-se apenas o primário do aplanático.

Outra proposta seria manter o primário e secundário do aplanático, alterando o absorvedor proposto para um que tivesse aletas, buscando aumentar a eficiência óptica do concentrador.

REFERÊNCIAS

BARANOV, V. K.; MELNIKOV, G. K. Solar collection of Geometrical optics. **Jounal Optical Society of America**. Vol. 33, p. 408-422, 1966.

BEHAR, O., A novel hybrid solar preheating gas turbine. **Energy Conversion and Management**. Vol. 158, pp. 120-132, 2018.

BENDT, P.; RABL, A.; GAUL, H. W.; REED, K. A. **Optical Analysis and Optimization of Line Focus Solar Collector**. SERI/TP-34-094. Solar Energy Research Institute, Golden, CO, 1979.

BENITEZ, P.; MIÑANO, J. C.; GARCIA, R.; ARROYO, R. M. **Contactless two-stage solar concentrators for tubular absorber**, Congress Proceedings of Spie, set. 2017

BETALGY, H.; SEMMAR, D.; SAID, N. **Performance of medium-power Fresnel Concentrator solar plant in Algerian sites**, International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, 2015.

CANAVARRO, D. **Modelização de Campos de Colectores Solares Lineares do Tipo Fresnel; Aplicação de um Concentrador Inovador do Tipo CLFR**. Lisboa, Portugal, IST, 2010, 79p., dissertação (Mestrado).

CANAVARRO, D.; CHAVES, J.; COLLARES-PEREIRA, M. Infinitesimal etendue and Simultaneous Multiple Surface (SMS) concentrators for fixed receiver troughs. **Solar Energy**, vol. 97, pp. 493-503, Setembro, 2013.

CHAVES, J. **Introduction to Nonimaging Optics**. New York, US: CRC Press, 2008.

COURROL, L. C.; PRETO, A. O. **Ótica Geométrica**. Editora Unifesp, São Paulo-SP, 2011

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2018: ano base 2017**, Rio de Janeiro: EPE, 2016, 294p., 2018.

FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F. **Energia Solar, Fundamentos e Tecnologias de Conversão Heliotérmica e Fotovoltaica**. Editora Universitária, Recife-PE. 1995.

FRAIDENRAICH, N.; PEDROSA FILHO, M. H. O.; VILELA, O. A new approach for obtaining angular acceptance function of non-perfect parabolic concentrating collectors. **Solar Energy**, Vol. 147, pp. 455-462, 2017.

GOLDSTEIN, A.; GORDON, J. M. Tailored solar optics for maximal optical tolerance and concentration. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Vol. 95, pp. 624-629, 2011.

GORDON, J. M. Aplanatic optics for solar concentration. **Optics express**, Vol. 18, p. A41-A52, 2010.

GORDON, J. M. Panorama for dual mirror aplanats for maximum concentration. **Applied Optics**, vol. 48, n. 6, p. 4926-4931, 2009.

GORDON, J. M. Simple string construction method for tailored edge-ray concentrators in maximum-flux solar energy collectors. **Solar Energy**, vol. 56, n. 3, p. 279-284, 1996.

GORDON, J. M.; FEUERMAN, D. Optical performance at the thermodynamic limit with tailored imaging designs. **Applied Optics**, Vol. 44, 2327–2331, 2005.

HEAD, A. K. **The two-mirror aplanat**. Proceedings of Physical Society, London, Vol. 70, p. 945–949, 1957.

HOMAS, A.; GÜVEN, H. M. Effect of optical errors on flux distribution around the absorber tube of a parabolic trough concentrator. **Energy Conversion and Management**, Vol. 35, n° 7, p. 575-582, 1994.

LYNDEN-BELL, D. Exact Optics: A Unification of Optical Telescope Design. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Vol. 334(4), 787–796, 2002.

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

MARSHALL, H.; FEUERMAN, D.; GORDON J. M. Aplanatic lenses revisited: the full landscape. **Applied Optics**, Vol 55, n 10, p. 2537-2542, 2016.

MCKENNA, E.; MCMANUS, M; COOPER, S.; THOMSON, M. Economic and environmental impact of lead-acid batteries in grid-connected domestic PV systems. **Applied Energy**, Vol. 104, p. 239-249, 2013.

MIÑANO, J.; BENÍTEZ, P.; LIN, W.; INFANTE, J.; MUÑOZ, F.; SANTAMARÍA, A. An application of the SMS method for imaging designs. **Optics Express**, Vol 17, n 26, p. 1541-1548, 2009.

MUÑOZ, R.; MARTÍNEZ-VAL, J. M.; ABBAS, R.; MUÑOZ-ANTÓN, J.; ROVIRA, A.; MONTES, M. J. A Concentrating solar power prototype for validating a new Fresnel-based plant design. **Energy Procedia**, Vol. 75 p. 423-429, 2015.

OLIVEIRA, J. A. **Análise óptica e geométrica de configurações dos concentradores Fresnel de coluna única**. Recife-PE, UFPE, 2014, 114p., dissertação (Mestrado).

OLIVEIRA, J. A.; FRAIDENRAICH, N.; VILELA, O. Sombra, bloqueio e área de perda de um concentrador linear Fresnel, análise de sensibilidade. **Revista Brasileira de Energia Solar**, Vol. 6, n. 2, p. 138-147, 2015.

OSTROUMOV, N.; GORDON, J.; FEUERMAN, D. Panorama of dual-mirror aplanats for maximum concentration. **Applied Optics**, Vol 48, n 26, p. 4926-4931, 2009.

PEDROSA FILHO, M. H. O. **Nova abordagem para a determinação da densidade de fluxo solar no absorvedor de concentradores solares**, Recife-PE. UFPE, 102p., Tese (Doutorado), 2013.

RABL, A. **Active solar collectors and their applications**. New York: Oxford University Press, 1985, 503p, 1985.

RABL, A.; BENDT, P. Effect of circumsolar radiation on performance of focusing collectors. **Journal of Solar Energy**, Vol. 104, p. 237-250, 1982.

RENEWABLE POWER NEWS, 2011. A radical emerge and initiative for Sustainable Solar Energy. 2009. Disponível em: <http://www.renewablepowernews.com/archives/422>. Acessado em: jul. 2018.

RODRIGUEZ-SANCHEZ, D.; ROSENGARTEN, G. Improving the concentration ratio of parabolic troughs a second stage flat mirror. **Applied Energy**, Vol. 159, p. 620-632, 2015.

ROLIM, M.; FRAIDENRAICH, N.; VILELA, O. **Otimização de parâmetros construtivos de coletores parabólicos lineares**. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar, São Paulo, 2012.

SHARMA, V. Hourly and monthly variation in shading and blocking of aperture area in a linear fresnel reflector field. **Energy Procedia**, Vol. 48, p. 233-241, 2014.

WINSTON, R. Light collection within the framework of geometrical optics. **Journal of Optical Society of America**, Vol.60, p. 245-257, 1970.

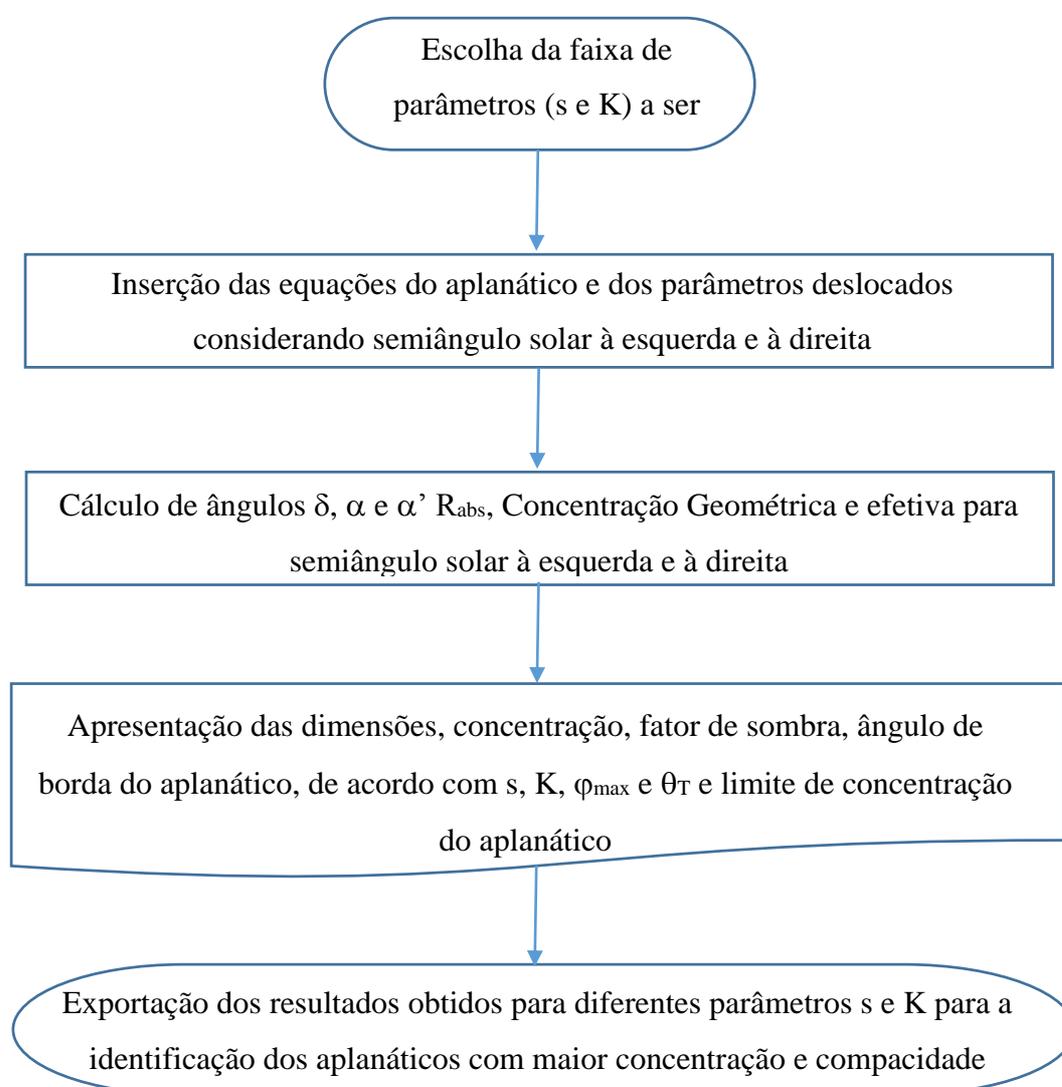
WINSTON, R.; MIÑANO, J. C.; BENÍTEZ, P. **Nonimaging Optics**. California: Elsevier 2005.

WINSTON, R.; ZHANG, W. Novel aplanatic designs. **Optics Letters**, Vol. 34, n19, p. 3018-3019, 2009.

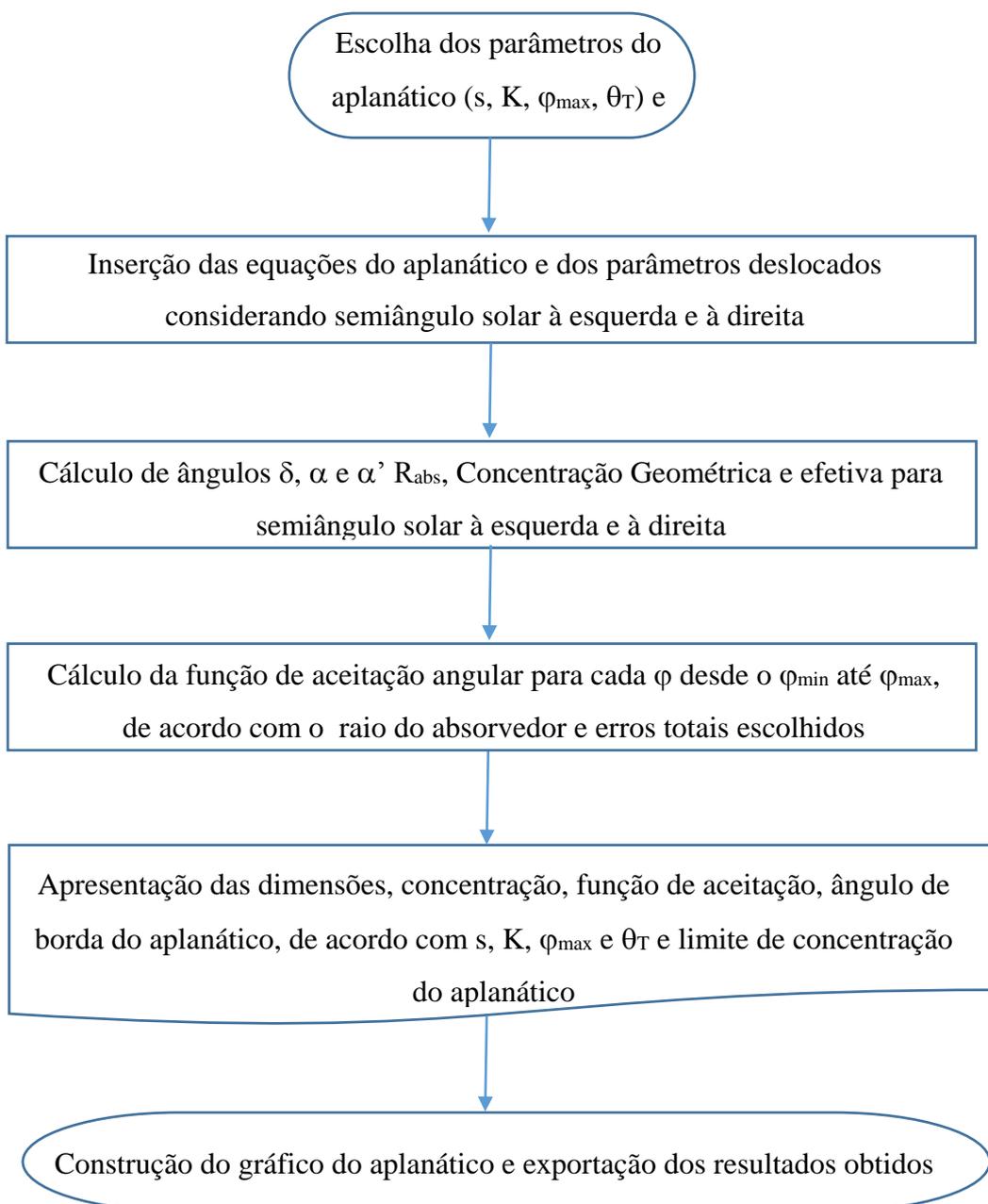
ZHU, G.; WENDELIN, T.; WAGNER, M. J.; KUTSCHER, C. History, current state, and future of linear Fresnel concentrating. **Solar Energy**, Vol. 103, p. 639-652, 2014.

APÊNDICE A – FLUXOGRAMAS DO PROGRAMA DO APLANÁTICO

A1 – ESCOLHA DO APLANÁTICO COM MAIOR CONCENTRAÇÃO ESCOLHIDO



A2 – CÁLCULO DOS PARÂMETROS OBTIDOS DO APLANÁTICO ESCOLHIDO



ANEXO A – DISTRIBUIÇÃO PADRÃO PARA O BRILHO SOLAR

$\theta_s(\text{mrad})$	$B(\theta_s)$ [W/m ² *sterad]
0,218	13631252
0,654	13561148
1,091	13441701
1,527	13263133
1,963	13012331
2,400	12668456
2,836	12185726
3,272	11443798
3,709	10061047
4,145	7002494
4,581	1730196
5,018	144818
5,454	63325
5,890	51116
6,327	43669
6,763	36973
7,199	31935
7,636	27979
8,072	24767
8,508	21830
9,381	17444
10,690	13084
11,999	10194
13,308	8177
14,617	6716
15,926	5634
17,235	4807
18,544	4147
19,853	3633
21,162	3213
22,471	2867
23,780	2579
25,089	2337
26,398	2133
27,707	1958
29,016	1805
30,325	1672
31,634	1550
32,943	1444
34,252	1353

34,561	1268
36,870	1194
38,179	1127
39,488	1070
40,797	1018
42,106	969
43,415	923
44,724	882
46,033	845
47,342	811
48,651	777
49,960	747
51,269	722
52,578	700
53,887	681
55,196	665

Adaptado: (RABL,1985)