

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS - CECA
ENGENHARIA DE ENERGIA**

RIVALDO MATHEUS NUNES PEREIRA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM CONCENTRADOR FOTOVOLTAICO DE
DUPLA REFLEXÃO PARA APLICAÇÃO NO ESPAÇO**

RIO LARGO

2025

Rivaldo Matheus Nunes Pereira

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM CONCENTRADOR FOTOVOLTAICO DE DUPLA
REFLEXÃO PARA APLICAÇÃO NO ESPAÇO

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), apresentado ao colegiado do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Alagoas(UFAL), *Campus* de Engenharias e Ciências Agrárias, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Faustino Lacerda de Souza

Rio Largo
2025

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

P436a Pereira, Rivaldo Matheus Nunes.

Análise de desempenho de um concentrador fotovoltaico de dupla reflexão para aplicação no espaço. / Rivaldo Matheus Nunes Pereira. – 2025.

63f.: il.

Orientador(a): Leonardo Faustino Lacerda de Souza.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energia) – Graduação em Engenharia de Energia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2025.

Inclui bibliografia

1. CPV. 2. Óptica aplicada. 3. Traçado de raios. 4. *SolTrace*. I. Título.

CDU: 620.91

Folha de Aprovação


Rivaldo Matheus Nunes Pereira

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM CONCENTRADOR FOTOVOLTAICO DE DUPLA REFLEXÃO PARA APLICAÇÃO NO ESPAÇO


Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), apresentado ao colegiado do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), *Campus* de Engenharias e Ciências Agrárias, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Energia pela Universidade Federal de Alagoas.

Data de Aprovação: 06/08/2025


Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 LEONARDO FAUSTINO LACERDA DE SOUZA
Data: 20/08/2025 16:04:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Leonardo Faustino Lacerda de Souza
Universidade Federal de Alagoas-UFAL
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 JERUSA GOES ARAGAO SANTANA
Data: 26/08/2025 15:38:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Jerusa Goés Aragão Santana
Universidade Federal de Alagoas-UFAL
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
(Examinadora)

Documento assinado digitalmente
 IGOR CAVALCANTE TORRES
Data: 27/08/2025 10:19:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Igor Cavalcante Torres
Universidade Federal de Alagoas-UFAL
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
(Examinador)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Rivaldo e Lucineide, pelo apoio ao longo dessa jornada. À minha irmã, Leuzy, pela atenção e carinho. A toda a minha família, meus avós, paternos e maternos, pelo carinho recebido, amo vocês.

Ao meu orientador, Professor Leonardo, pela atenção constante e apoio. Pela empolgação durante as descobertas, foi ótimo compartilhar isso. Muito obrigado.

Ao professor Gordon, pela iluminação das discussões, que foi essencial durante a realização deste trabalho.

À professora Jerusa, muito obrigado pela compreensão, apoio e suporte nas horas difíceis. As conversas foram sempre cruciais na renovação do espírito.

Ao professor Rinaldo, pelas oportunidades durante a iniciação científica.

Aos professores de Engenharia de Energia, com quem pude aprender tanto durante esta etapa acadêmica. Muito obrigado.

Aos amigos do CECA, desde o começo da graduação, Tiago, Thamyres, Janaína, Kadu, Vitor, Auderio, Walis, Joelington, Gabriel e Rubens. Foi ótimo compartilhar momentos com vocês.

Ao meu amigo Rafael, muito obrigado pela atenção e suporte contínuo. Sem isso, seria mais difícil completar essa fase.

A todos os outros que aqui não menciono, mas que conheci e pude viver momentos especiais e alegres, meu muito obrigado.

“Criar não é imaginação, é correr o grande risco de se ter a realidade.”

Clarice Lispector

RESUMO

Este trabalho conduz uma investigação de configuração inédita de microconcentrador fotovoltaico ultracompacto aplicado ao ambiente espacial. Sendo explorado um tema ainda muito pouco abordado na literatura, o que representa uma oportunidade, devido à tecnologia ir ao encontro das necessidades da exploração espacial, que busca conciliar alto desempenho, redução de massa e custos. O sistema estudado utiliza óptica de dupla reflexão com células bifaciais, visando ampliar o ângulo de aceitação – fator que é crucial no espaço. O desempenho óptico foi analisado, com a especificação de todos os caminhos de raios no sistema e as suas respectivas contribuições nas faces da microcélula sob distintas circunstâncias. A simulação foi executada para um caso ideal, de modo que todos os efeitos ópticos previstos nessa condição foram modelados. Também são sugeridas alternativas ao uso das células de multijunção, como a perovskita. O concentrador, de formato parabólico, foi avaliado sob a variação dos parâmetros geométricos, utilizando da técnica de traçado de raios no *SolTrace*. Os resultados são promissores, com aceitação angular maior que 10° sob fator de interceptação acima de 0,88, sendo superior aos valores encontrados na literatura. Esta configuração de concentrador ultracompacto, diante dos resultados, revela-se um avanço no estado da arte dos microconcentradores fotovoltaicos de aplicação espacial e contribui para o desenvolvimento de soluções mais eficientes, com menor massa e custo reduzido para futuras missões.

Palavras-chave: CPV; óptica aplicada; traçado de raios; *SolTrace*.

ABSTRACT

This work investigates a novel ultracompact photovoltaic microconcentrator configuration applied to the space environment. The topic remains scarcely explored in the literature, representing an opportunity since the technology meets the needs of space exploration, which seeks to combine high performance with reduction of mass and costs. The studied system employs dual-reflection optics with bifacial cells, aiming to increase the acceptance angle – which is a crucial factor in space. The optical performance was analyzed by mapping all ray paths in the system and their respective contributions to the microcell surfaces under different circumstances. An ideal case was simulated, allowing all predicted optical effects under such conditions to be modeled. Alternatives to the use of multijunction cells, such as perovskite, are also suggested. The concentrator, of a parabolic shape, was evaluated under variation of its geometric parameters using the ray-tracing technique in SolTrace. The results are promising, showing an angular acceptance greater than 10° with an intercept factor above 0.88, surpassing values reported in the literature. This ultracompact concentrator configuration, based on the obtained results, represents an advance in the state of the art of photovoltaic microconcentrators for space applications and contributes to the development of more efficient, lighter, and lower-cost solutions for future missions.

Keywords: CPV; applied optics; ray-tracing; SolTrace.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – μ CPV de dupla reflexão.	13
Figura 2 – Áreas de abertura do concentrador e absorvedor: (a) vista lateral; (b) vista superior.	16
Figura 3 – Função de aceitação para um concentrador real e ideal.	19
Figura 4 – Descrição da razão de aspecto.	20
Figura 5 – Erros na superfície.	22
Figura 6 – Luz na interface dielétrico-vácuo.	23
Figura 7 – RIT no concentrador.	25
Figura 8 – Absorção da luz solar numa célula de tripla junçã de InGaP2/InGaAs/Ge. . .	27
Figura 9 – Montagem das CICs no satélite.	28
Figura 10 – Protótipo do μ CPV.	30
Figura 11 – Etapas.	33
Figura 12 – Relações no concentrador.	34
Figura 13 – Traçados ópticos possíveis no concentrador.	39
Figura 14 – Simulação com ângulo de incidência normal ao concentrador.	40
Figura 15 – Avaliação da distância absorvedor-secundário - D_{a-s} (no foco): (a) fator de interceptação total; (b) dos raios que atingem a face superior do absorvedor; e (c) na face inferior.	42
Figura 16 – RIT para a distância de $D_{a-s} = 1D$ sob $\beta = 9,66^\circ$	43
Figura 17 – Avaliação da distância absorvedor-secundário - D_{a-s} (abaixo do foco): (a) fator de interceptação total; (b) dos raios que atingem a face superior do absorvedor; e (c) na face inferior.	44
Figura 18 – Avaliação da variação de φ (no foco): (a) fator de interceptação total; (b) dos raios que atingem a face superior do absorvedor; e (c) na face inferior.	46
Figura 19 – Avaliação da variação de φ (abaixo do foco): (a) fator de interceptação total; (b) dos raios que atingem a face superior do absorvedor; e (c) na face inferior.	47
Figura 20 – Avaliação do aumento da área do secundário (no foco): (a) fator de interceptação total; (b) dos raios que atingem a face superior do absorvedor; e (c) na face inferior.	48
Figura 21 – Avaliação do aumento da área do secundário (abaixo do foco): (a) fator de interceptação total; (b) dos raios que atingem a face superior do absorvedor; e (c) na face inferior.	49
Figura A-11– γ_{P1} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário.	56
Figura A-12– γ_{P2} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário.	56

Figura A-13— γ_{P3} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário. . . .	56
Figura A-14— γ_{P4} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário. . . .	57
Figura A-15— γ_{P5} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário. . . .	57
Figura A-16— γ_{P6} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário. . . .	57
Figura A-21— γ_{P1} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário. . . .	58
Figura A-22— γ_{P2} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário. . . .	58
Figura A-23— γ_{P3} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário. . . .	58
Figura A-24— γ_{P4} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário. . . .	59
Figura A-25— γ_{P5} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário. . . .	59
Figura A-26— γ_{P6} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário. . . .	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo de resultados.	50
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPV	Energia solar fotovoltaica de concentração, do inglês, <i>Concentrator Photovoltaics</i>
μ CPV	Energia solar fotovoltaica com microconcentrador do inglês, <i>μConcentrator Photovoltaics</i>
RIT	Reflexão Interna Total
MJ	Células de multijunção, do inglês, <i>Multi-Junction</i>
TJ	Células de tripla junção, do inglês, <i>Triple Junction</i>
CICs	Células interconectadas com cobertura de vidro, do inglês, <i>Coverglass Interconnected Cells</i>
PGM	Moldagem de vidro de precisão, do inglês, <i>Precision Glass Molding</i>
GNU	Projeto de software livre (<i>GNU's Not Unix</i>)
PV	Fotovoltaico, do inglês, <i>Photovoltaic</i>
HCPV	CPV de alta concentração, do inglês, <i>High Concentration Photovoltaics</i>
MCPV	CPV de média concentração, do inglês, <i>Medium Concentration Photovoltaics</i>
LCPV	CPV de baixa concentração, do inglês, <i>Low Concentration Photovoltaics</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

η_{opt}	Eficiência óptica
γ	Fator de interceptação
γ_{P1}	Fator de interceptação no caminho óptico 1
γ_{P2}	Fator de interceptação no caminho óptico 2
γ_{P3}	Fator de interceptação no caminho óptico 3
γ_{P4}	Fator de interceptação no caminho óptico 4
γ_{P5}	Fator de interceptação no caminho óptico 5
γ_{P6}	Fator de interceptação no caminho óptico 6
γ_1	Fator de interceptação para a face de cima da microcélula
γ_2	Fator de interceptação para a face de baixo da microcélula
γ_{max}	Fator de interceptação definido no valor máximo, normalmente para $\beta = 0^\circ$
τ	Transmissividade
ρ	Refletividade
α	Absortividade
γ_1	Fator de interceptação na face de cima do absorvedor
γ_2	Fator de interceptação na face de baixo do absorvedor
φ	Ângulo de borda
β	Ângulo de incidência
β_{max}	Ângulo de incidência máximo da simulação de traçado de raios
β_i	Ângulo de incidência no dielétrico
β_t	Ângulo do raio transmitido no dielétrico
$\beta_{i,l}$	Ângulo incidente na lente, na fronteira dielétrico-ar. Interno, dentro do dielétrico
$\beta_{t,l}$	Ângulo de transmissão na lente, na fronteira dielétrico-ar. Interno, dentro do dielétrico

β_c	Ângulo crítico, que permite a RIT
θ	Ângulo de aceitação
θ_{real}	Ângulo de aceitação real, considerando as imperfeições ópticas
θ_{max}	Ângulo de aceitação máximo, para um sistema idealizado
AR	Razão de aspecto
AR_1	Razão de aspecto, caso no foco
AR_2	Razão de aspecto, caso abaixo do foco
C_g	Concentração geométrica
C_f	Concentração de fluxo
$C_{max,3D}$	Concentração máxima no limite termodinâmico de uma geometria tridimensional
$C_{max,3D,CD}$	Concentração máxima no limite termodinâmico de uma geometria tridimensional com dielétrico
$C_{max,3D,SD}$	Concentração máxima no limite termodinâmico de uma geometria tridimensional sem dielétrico
x_P	Raio de abertura do primário
x_A	Raio de abertura da microcélula
x_S	Raio de abertura do secundário
x_L	Raio de abertura da lente
h	Altura do foco em relação à origem
h_C	Altura do concentrador
f	Comprimento focal do concentrador
k	Deslocamento vertical da parábola em relação à origem
z_A	Altura do absorvedor em relação à origem
z_S	Altura do secundário em relação à origem
$z_{A,1}$	Altura do absorvedor em relação à origem, caso no foco
$z_{S,1}$	Altura do secundário em relação à origem, caso no foco

$z_{A,2}$	Altura do absorvedor em relação à origem, caso abaixo do foco
$z_{S,2}$	Altura do secundário em relação à origem, caso abaixo do foco
Δs	Semiângulo do cone solar ($\beta = 0^\circ$)
$\Delta s'$	Semiângulo do cone solar ($\beta > 0^\circ$)
Δx	Diferença entre o raio da lente e do concentrador, quando no β_{max}
A_c	Área de abertura do concentrador
A_{abs}	Área de abertura do absorvedor
A_{sec}	Área de abertura do secundário
D	Distância base, no eixo óptico, entre absorvedor e secundário
D_{a-s}	Distância, no eixo óptico, entre absorvedor e secundário
I_c	Fluxo de energia na abertura do concentrador
I_{abs}	Fluxo de energia na abertura do absorvedor
n	Índice de refração do meio na interface com o dielétrico (vácuo)
n'	Índice de refração do dielétrico
ξ	<i>étendue</i>
R_{abs}	Quantidade de raios que chegam ao absorvedor
R_p	Quantidade de raios que alcançam o espelho primário
$\sigma_{sol,pontofocal}$	Erro do brilho solar para um concentrador de ponto focal
$\sigma_{sol,linhafocal}$	Erro do brilho solar para um concentrador de linha focal
σ_{sol}	Erro do brilho solar
σ_{esp}	Erro óptico especular
σ_{geo}	Erro óptico devido ao contorno da geometria
σ_{ras}	Erro óptico de rastreamento
σ_{des}	Erro óptico de deslocamento do absorvedor
σ_{opt}	Erro óptico global
σ_{tot}	Erro global no sistema

R_{\parallel}	Parcela da luz refletida no dielétrico, paralela ao plano incidente
T_{\parallel}	Parcela da luz transmitida no dielétrico, paralela ao plano incidente
R_{\perp}	Parcela da luz refletida no dielétrico, ortogonal ao plano incidente
T_{\perp}	Parcela da luz transmitida no dielétrico, ortogonal ao plano incidente
A_{\parallel}	Coefficiente de amplitude da onda, paralela ao plano incidente
A_{\perp}	Coefficiente de amplitude da onda, ortogonal ao plano incidente
\vec{A}	Amplitude do vetor campo elétrico
\hat{s}_i	Versor direção de propagação da onda incidente no dielétrico
\hat{s}_t	Versor direção de propagação da onda transmitida no dielétrico
\hat{s}_r	Versor direção de propagação da onda refletida no dielétrico
\hat{n}	Versor normal à superfície do dielétrico
\mathbb{R}^3	Espaço vetorial tridimensional
$R_{\perp, \beta_i=0^\circ}$	Parcela da luz refletida na lente, ortogonal ao plano incidente, na incidência normal
$R_{\parallel, \beta_i=0^\circ}$	Parcela da luz refletida na lente, paralela ao plano incidente, na incidência normal
$\rho_{\parallel, \beta_i=0^\circ}$	Refletividade quando na condição paralela ao plano incidente, na incidência normal
λ	Comprimento de onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Gerais	14
1.1.2	Específicos	14
2	CONCEITOS PRELIMINARES	16
2.1	Concentração solar	16
2.1.0.1	Limite termodinâmico	17
2.1.0.2	Aplicação neste estudo	18
2.2	Fator de interceptação	18
2.3	Razão de aspecto	20
2.4	Erros ópticos e do brilho solar	21
2.5	Equações de Fresnel	22
2.6	Reflexão interna total	24
3	REVISÃO DE LITERATURA	26
3.1	Contextualização dos sistemas CPV	26
3.2	Energia solar no espaço	27
3.2.1	O CPV no espaço	28
3.2.1.1	Desafios e restrições	29
3.2.1.2	Oportunidades e perspectivas	29
4	METODOLOGIA	32
4.1	Definições geométricas	33
4.1.1	O paraboloide circular	33
4.1.2	O secundário e o absorvedor	34
4.1.2.1	Posição do secundário e absorvedor	35
4.1.3	O dielétrico	35
4.2	Traçado de raios	36
4.2.1	Considerações físicas e geométricas	37
4.2.1.1	Equações de Fresnel	37
4.2.1.2	O cone solar	37
4.2.1.3	Caminhos ópticos	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40

5.1	Geometria simétrica	40
5.1.1	Distância absorvedor - secundário	41
5.1.2	Varição do ângulo de borda	46
5.1.3	Aumento da área do secundário	47
5.1.4	Resumo dos resultados	49
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICE A – CAMINHOS ÓPTICOS	56
A.1	Paraboloide circular com secundário no foco	56
A.2	Paraboloide circular com secundário abaixo do foco	58

1 INTRODUÇÃO

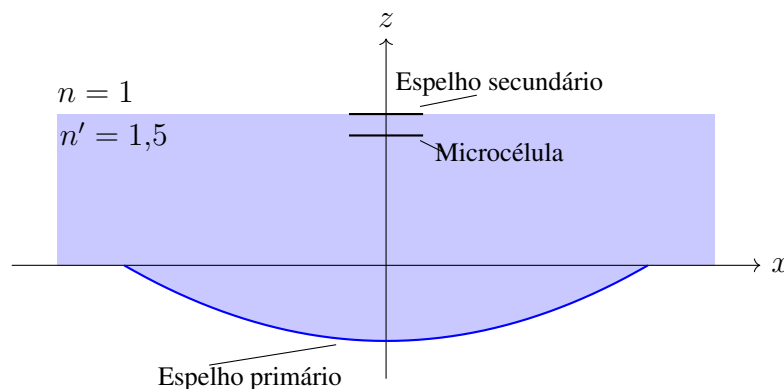
A exploração espacial é um tema emergente de pesquisa, o que compreende técnicas de engenharia e ciência de ponta. Diversos atores, sejam empresas públicas ou privadas, demandam crescentemente geração de potência (INTERNATIONAL SPACE EXPLORATION COORDINATION GROUP (ISECG), 2015; GORDON, 2022; RUCKER, 2024). A energia solar, através de células conectadas e cobertas com vidro (*CIC*, do inglês, *Coverglass Interconnected Cells*), é a norma de uso no ambiente espacial devido à sua confiabilidade e eficiência (BAILEY; RAFFAELLE, 2010).

Essa tecnologia, apesar de bem estabelecida, apresenta altos custos e elevada complexidade de fabricação (BAIJU; YAREMA, 2022; RODGERS et al., 2024). Assim, a aplicação de óptica de concentração à energia solar fotovoltaica, com microcélulas (μ CPV, do inglês, *Concentrator Photovoltaics*), surge como uma alternativa promissora nesse ambiente.

A pesquisa sobre o μ CPV busca estabelecer uma alternativa competitiva às *CICs*, com o potencial de aumentar a eficiência por unidade de massa, que é um aspecto crucial em dispositivos espaciais, além de atuar positivamente na redução de custos e no gerenciamento térmico (RUUD et al., 2019).

Pretende-se explorar o potencial do μ CPV, a partir da comparação com os resultados de Ruud et al. (2019). O μ CPV aqui proposto é um sistema de dupla reflexão de geometria parabólica (figura 1), sendo composto por dois espelhos: primário e secundário ¹.

Figura 1 – μ CPV de dupla reflexão.



Fonte: O autor (2025).

Com o objetivo de aproveitar o potencial da dupla reflexão, o trabalho explora o uso

¹O primário é o primeiro estágio óptico de reflexão, sendo representado pelo espelho em formato de paraboloide. O secundário é o espelho plano, segundo estágio óptico de reflexão

de microcélulas bifaciais. No intuito da diminuição de custos e escalabilidade de produção, propõe-se o uso de as microcélulas fabricadas em perovskita. O rápido crescimento de eficiência da perovskita, mantém o interesse em perspectivas de flexibilidade em conjunto ao baixo custo e alto desempenho (GREEN et al., 2014).

A avaliação é realizada por análises de sensibilidade dos parâmetros geométricos do concentrador. O estudo visa contribuir com o avanço da tecnologia solar no espaço, oferecendo novas possibilidades para satélites e outros dispositivos em órbita, em termos de aumento de eficiência e redução de massa.

O trabalho está organizado em seções, apresentados em sequência lógica de conteúdo. Inicialmente, são expostos os objetivos, gerais e específicos, que norteiam a pesquisa. Em seguida, os conceitos preliminares introduzem os termos técnicos e as relações fundamentais. A revisão de literatura é realizada, explorando o histórico e descrevendo as condições atuais do μ CPV no espaço. Na metodologia, descrevem-se as condições adotadas e os procedimentos empregados na análise óptica. A seção dos resultados e discussões analisa os dados obtidos e suas implicações. Por fim, as considerações finais sintetizam as conclusões do estudo e propõem sugestões de trabalhos futuros. Apêndices fornecem os resultados sobre cada um dos caminhos ópticos observados.

1.1 Objetivos

1.1.1 Gerais

Este trabalho visa investigar o desempenho de concentradores fotovoltaicos de dupla reflexão para aplicação espacial em comparação com o concentrador de Ruud et al. (2019). A pesquisa busca encontrar, através da sensibilidade dos parâmetros geométricos, os valores e configurações ideais que proporcionem melhor desempenho óptico ao sistema e compacidade, em termos do fator de interceptação e da razão de aspecto. Por fim, o objetivo é ampliar o conhecimento existente, na busca por um desempenho ótimo, que supere o referenciado na literatura de μ CPVs aplicados no espaço.

1.1.2 Específicos

- Análise óptica do μ CPV, com descrição dos fenômenos físicos presentes;
- Simulação com uso de *software* de traçado de raios dos caminhos ópticos no concentrador;

- Comparação com os resultados obtidos na literatura;
- Verificação, por meio da sensibilidade de parâmetros, quais os valores ótimos com melhor aceitação angular e razão de aspecto.

2 CONCEITOS PRELIMINARES

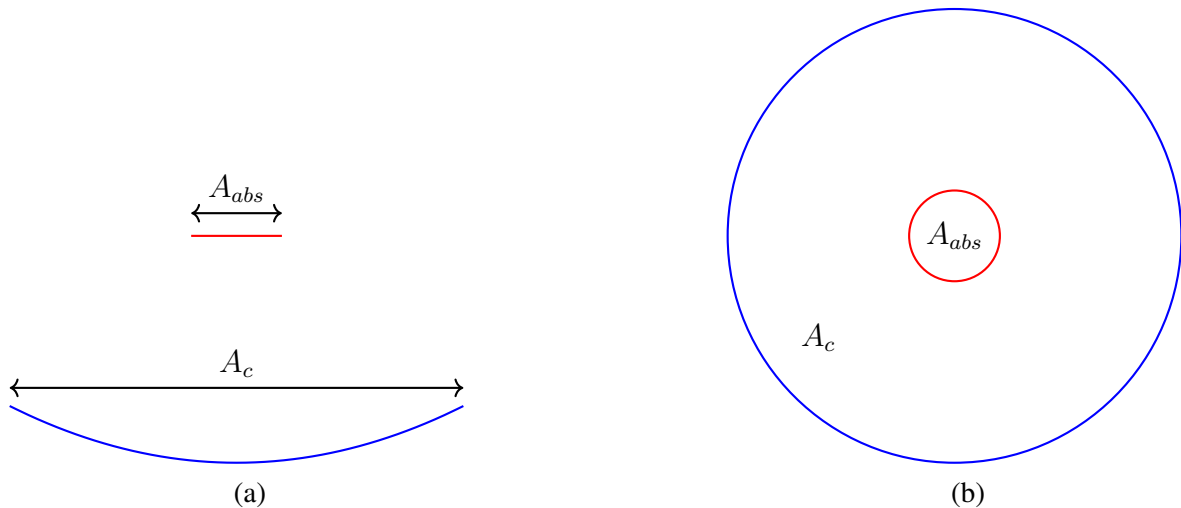
Esta seção tem o intuito de expor as definições dos conceitos-chave analisados no trabalho. Aqui são descritos parâmetros específicos, utilizados em óptica de concentração solar. O objetivo é situar o leitor no contexto do estudo, descrevendo a importância dessas métricas e como elas são utilizadas ao longo do trabalho.

2.1 Concentração solar

Esta é uma métrica particularmente relevante em sistemas CPV, pois impacta diretamente a eficiência das células e a quantidade de material necessário para a concentração da luz solar (EJAZ et al., 2021). A definição em termos geométricos é uma das maneiras de expressar a concentração geométrica (C_g), conforme Winston et al. (2005), que a expressa pela razão entre a área de abertura do concentrador (A_c) e a do absorvedor (A_{abs}) (Figura 2),

$$C_g = \frac{A_c}{A_{abs}} \quad (1)$$

Figura 2 – Áreas de abertura do concentrador e absorvedor: (a) vista lateral; (b) vista superior.



Fonte: o autor (2025).

A concentração pode também ser expressa em termos do fluxo de energia (irradiância), na abertura do concentrador (I_c) e a do absorvedor (I_{abs}),

$$C_f = \frac{I_c}{I_{abs}} \quad (2)$$

Esta última relação é mais apropriada em aplicações de CPV. Pois quantifica, além dos efeitos geométricos, a real absorção da luz na célula PV (RABL, 1985). Também é chamada de concentração efetiva ou de fluxo (C_f) e pode ser relacionada com C_g em termos da eficiência óptica (η_{opt}),

$$C_f = \eta_{opt} C_g \quad (3)$$

2.1.0.1 Limite termodinâmico

No caso de um sistema ideal, toda a energia disponível é capturada. O que representa o limite teórico da concentração, estabelecido pela segunda lei da termodinâmica, que quantifica a concentração máxima permitida, para uma geometria tridimensional ($C_{max,3D}$) (WINSTON et al., 2005),

$$C_{max,3D} = \left(\frac{n'}{n \sin \Delta s} \right)^2 \quad (4)$$

aqui, (4) considera a conservação do *étendue* no concentrador tridimensional. O valor Δs é o ângulo limite teórico de rastreamento permitido, definido como o semiângulo do cone solar. Essa equação também leva em conta os índices de refração do dielétrico, n' e o do meio na sua interface, n .

Como descrito em (4), a presença do dielétrico n' no concentrador aumenta sua concentração sem violações físicas. A conservação do *étendue* é mantida, $\xi = (n A_c \theta / n')^2$, devido a que um aumento de n' resulta na redução da área A_c do concentrador. Nesta relação, θ é o semiângulo de aceitação do dielétrico. O *étendue* é um conceito físico que expressa o fluxo de potência que passa através de um dielétrico, em suma, o produto de sua área pela aceitação angular (WINSTON et al., 2005). A relação de concentração entre um sistema com e sem dielétrico no limite do fluxo máximo é $C_{max,3D,CD} = n' C_{max,3D,SD}$.

Portanto, a concentração geométrica nunca alcança o limite termodinâmico. A luz solar não é colimada, isto é, os raios não são paralelos, a sua abertura angular é um ângulo sólido e o raio desse ângulo é Δs , o semiângulo de abertura do cone solar (CHAVES, 2016). Δs é obtido a partir da distribuição de brilho do disco solar, possuindo natureza geométrica.

2.1.0.2 Aplicação neste estudo

Para o concentrador deste estudo, o espelho primário e absorvedor possuem abertura circular, assim, C_g pode ser obtido apenas pela relação dos raios de abertura do primário (x_P) e da célula (x_A),

$$C_g = \left(\frac{x_P}{x_A} \right)^2 \quad (5)$$

2.2 Fator de interceptação

A eficiência óptica do concentrador é definida em termos de suas propriedades ópticas e do fator de interceptação,

$$\eta_{opt} = \rho\tau\alpha\gamma \quad (6)$$

em que, ρ é a refletividade dos espelhos, τ a transmissividade do vidro, α a absorvidade do absorvedor e γ o fator de interceptação. O fator de interceptação é a fração dos raios incidentes na abertura do primário (R_p) que chegam ao absorvedor (R_{abs}) (RABL, 1985),

$$\gamma = \frac{R_{abs}}{R_p} \quad (7)$$

γ pode ser também expresso pelas parcelas dos raios que alcançam a face de cima da célula, γ_1 , e os que interceptam a face de baixo, por γ_2 , logo,

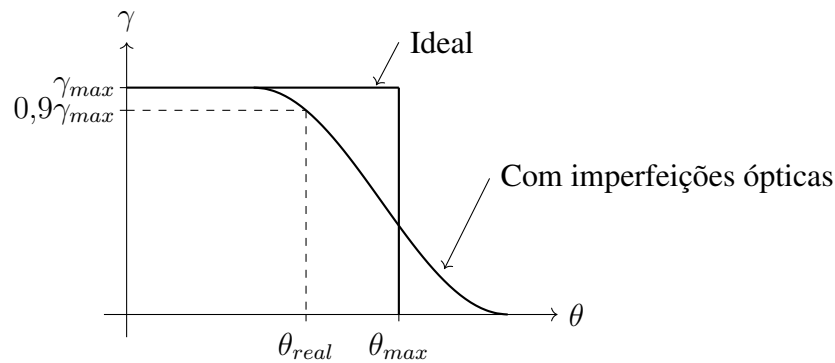
$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (8)$$

Para sistemas de concentração solar que exigem tolerância angular para captação da luz, o fator de interceptação está diretamente relacionado com seu semiângulo de aceitação, θ , ou simplesmente ângulo de aceitação. θ_{real} corresponde ao ângulo de incidência máximo que o sistema óptico consegue captar luz eficientemente, definido para $\gamma = 0,9\gamma_{max}$ (CHAVES, 2016; WINSTON et al., 2005). γ_{max} é o valor nominal máximo, que ocorre em um ângulo de incidência paralelo ao eixo óptico ($\beta = 0^\circ$).

Plotar a curva da eficiência óptica em função da aceitação angular do sistema é uma prática comum na concentração solar, especialmente em concentradores estáticos, como os parabólicos compostos (CPC). Essa curva apresenta um padrão típico: a eficiência mantém-se constante enquanto o ângulo de incidência está no intervalo de aceitação angular, $\beta \leq \theta$. A partir

do momento em que a incidência solar é maior que a aceitação, a eficiência começa a cair (Figura 3).

Figura 3 – Função de aceitação para um concentrador real e ideal.



Fonte: O autor (2025).

A Figura 3 apresenta os concentradores ideal e real. No concentrador ideal não há erros ópticos e aberrações associadas, este opera de modo completamente ideal, inclusive com um fluxo de luz solar de raios colimados ($\sigma_{sol} = 0$). Esse absorvedor coleta toda a luz dentro do máximo teórico θ_{max} e nenhum raio além desse intervalo angular. Porém, para um concentrador real, deve-se considerar as aberrações ópticas (coma, esférica, cromática), a desvio da abertura do cone solar e os erros ópticos existentes (e.g. da superfície do material, problemas de montagem, desalinhamentos, erros de rastreamento). Com isso, a eficiência real apresenta uma menor aceitação angular ($\theta_{real} < \theta_{max}$). A curva real também apresenta um padrão de queda distinto do caso ideal (que é abrupto): de modo gradativo. O gráfico também admite, para ambos os casos, que os materiais utilizados apresentam propriedades ópticas perfeitas: absorvidade, transmissividade e refletividade são iguais a 1.

O ângulo de incidência, β , é definido pelo ângulo formado entre o vetor de propagação da luz solar e o eixo óptico do concentrador. Normalmente, a eficiência óptica em concentradores é avaliada para uma incidência normal $\beta = 0^\circ$, sendo um padrão para testes (SOUZA, 2022). No entanto, em concentradores sem rastreamento ou com exigências de avaliação do desvio angular, torna-se crucial avaliar a eficiência óptica para estabelecer sua tolerância angular (θ). Devido a isso, para a concentração no espaço, em que é exigida alta precisão, é crucial avaliar a curva do fator de interceptação e de seu ângulo de aceitação.

Para aplicações espaciais, é esperado no mínimo um $\theta \geq 5^\circ$, esse valor visa estabelecer uma margem de segurança, que inclui os potenciais erros, inerentes ao ambiente espacial, como distorção térmica e vibrações estruturais (RUUD et al., 2019). Pelo limite termodinâmico

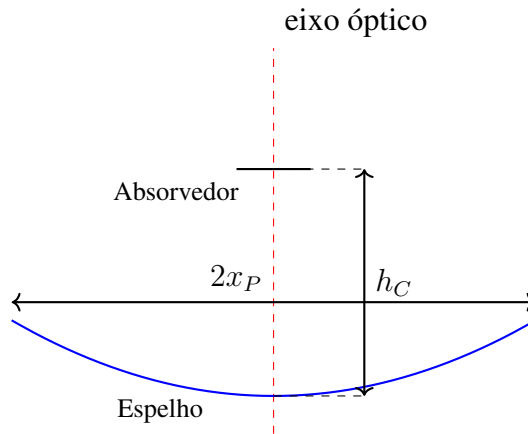
(equação 4), C_g e θ são inversamente proporcionais, logo, dentro da tolerância angular mínima exigida, a concentração limite é definida como $C_g < 100$.

2.3 Razão de aspecto

A razão de aspecto (do inglês, *Aspect Ratio* - AR) é outro parâmetro fundamental em concentradores. Esse valor expressa o quão a geometria do concentrador é compacta. Pode ser avaliado a partir da relação de sua altura (h_C) pela abertura ($2x_P$) (Figura 4):

$$AR = \frac{h_C}{2x_P} \quad (9)$$

Figura 4 – Descrição da razão de aspecto.



Fonte: O autor (2025).

Esta métrica é uma das mais significativas para o projeto do concentrador. Para uso no ambiente espacial, buscam-se dispositivos que possam minimizar a densidade de massa (kg / m^2), o que resulta em redução de custos, devido à menor quantidade de material utilizada e também em menor peso – crucial para lançamentos espaciais (RUUD et al., 2023). Assim, a razão de aspecto deve ser a menor possível. O objetivo central de otimização nessa tecnologia consiste em sumarizar um concentrador ultracompacto a uma alta concentração para um θ adequado às aplicações espaciais.

Dado um concentrador parabólico, como o da Figura 4 e fixando uma abertura constante, o AR é sensível ao ângulo de borda (φ) e à distância entre absorvedor e vértice (h_C). Na parábola, se o ângulo de borda aumenta, seu comprimento focal diminui, assim, numa parábola profunda, há uma menor distância h_C , sendo mais compacta. Reduzir a altura do receptor em relação

ao foco também resulta em um menor AR, devido à diminuição de h_C . Essas são, portanto, condições relevantes a serem avaliadas.

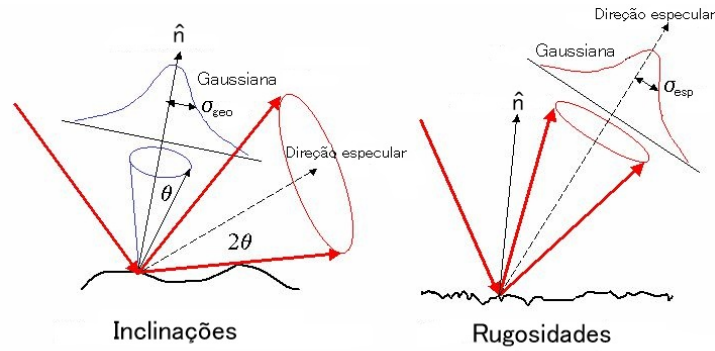
2.4 Erros ópticos e do brilho solar

Os erros ópticos (ou desvios) são inerentes aos projetos de concentradores, devido às imperfeições nos materiais que constituem o concentrador, sendo uma das causas da diminuição de eficiência, através do espalhamento da imagem formada no absorvedor (FILHO, 2013). Além disso, há o desvio da fonte (sol), que tem como causa a dispersão da luz solar devido aos efeitos atmosféricos. Esses erros são obtidos a partir de análise estatística, a partir de uma curva de distribuição normal, garantido pelo Teorema Central do Limite (RABL, 1985). São expressos pela largura angular rms (valor quadrático médio ou, do inglês: *root mean square*) e em miliradiano (mrad). Os erros ópticos são:

1. σ_{esp} , é um efeito microscópico, causado por rugosidades na superfície refletora, tendo como consequência a dispersão da radiação fora da direção **especular**;
2. σ_{geo} , referido também como erro de inclinação ou contorno, é resultante da **geometria** (efeito macroscópico) do refletor. Devido à Lei de Snell, quando o raio atinge a superfície inclinada, a reflexão em relação à normal da superfície resulta em vetor erro de $2\sigma_{geo}$;
3. σ_{ras} : ocorre devido ao posicionamento incorreto do rastreador (**rastreamento**);
4. σ_{des} : resultado do **deslocamento** do absorvedor, pode ser paralela e/ou perpendicular à abertura do concentrador.

Os erros ópticos nas superfícies dos espelhos são ilustrados na Figura 5, com o erro geométrico e o especular.

Figura 5 – Erros na superfície.



Fonte: adaptado de Wendelin (2003).

Juntos, a soma desses erros resulta nos erros ópticos,

$$\sigma_{opt}^2 = \sigma_{esp}^2 + 4\sigma_{geo}^2 + \sigma_{ras}^2 + \sigma_{des}^2 \quad (10)$$

No concentrador de ponto focal, analisado neste trabalho, o sol aparenta ser maior que um coletor de linha focal (e.g. calha parabólica), devido à maior parcela de radiação não aceita (RABL, 1985), o que resulta $\sigma_{sol,pontofocal} = \sigma_{sol,linhafocal}\sqrt{2}$.

Esses erros podem ser combinados de modo a representar o desvio global,

$$\sigma_{tot}^2 = \sigma_{opt}^2 + \sigma_{sol}^2 \quad (11)$$

O vidro que preenche o concentrador impõe uma dificuldade óptica adicional: reflexões de Fresnel. Esse fenômeno físico pode ser importante causa de perdas no dispositivo, portanto, é um assunto que merece atenção de estudo. A seção seguinte propõe analisar perdas ópticas na superfície refrativa a partir dessa condição adicional. Também são propostas soluções para mitigar o problema.

2.5 Equações de Fresnel

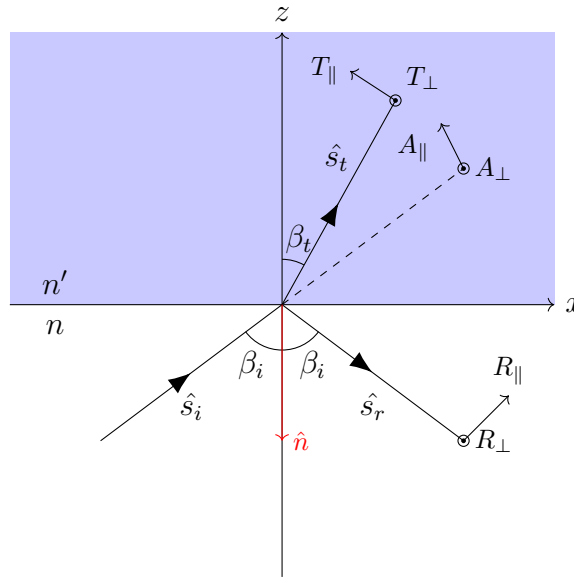
Em 1823, no âmbito da teoria elástica da luz, Fresnel analisou o comportamento da luz a partir de uma abordagem mecânica, considerando sua interação com interfaces entre meios distintos. A partir disso, deduziu a polarização da luz, decompondo o seu campo vibratório em duas componentes: perpendicular e paralela ao plano de incidência (BORN et al., 1999).

Mais tarde, com o desenvolvimento do eletromagnetismo por Maxwell, foi possível obter as mesmas relações, oferecendo uma descrição mais completa do fenômeno. Esta nova

derivação incorporou os campos elétrico e magnético, com o campo elétrico nas situações de perpendicularidade ao plano de incidência e paralelo a ele. Isso permite mensurar as parcelas de onda refletida e transmitida para cada componente (HECHT, 2017).

As equações preveem que mesmo para um material perfeito há perdas por reflexão, então, quando um raio atinge um dielétrico, parte será transmitida e outra refletida (Figura 6).

Figura 6 – Luz na interface dielétrico-vácuo.



Fonte: Adaptado de Born et al. (1999).

As parcelas refletida (R) e transmitida (T) no material n' são divididas em dois tipos de onda, paralela (\parallel) e, ortogonal (\perp) ao plano de incidência.

$$R_{\parallel} = \frac{n' \cos \beta_i - n \cos \beta_t}{n' \cos \beta_i + n \cos \beta_t} A_{\parallel} \quad (12)$$

$$R_{\perp} = \frac{n \cos \beta_i - n' \cos \beta_t}{n \cos \beta_i + n' \cos \beta_t} A_{\perp} \quad (13)$$

$$T_{\parallel} = \frac{2n \cos \beta_i}{n' \cos \beta_i + n \cos \beta_t} A_{\parallel} \quad (14)$$

$$T_{\perp} = \frac{2n \cos \beta_i}{n \cos \beta_i + n' \cos \beta_t} A_{\perp} \quad (15)$$

Essas equações, juntas, formam as *Equações de Fresnel*. Nessas relações, β_i representa o ângulo definido entre o raio incidente e o versor normal à interface, ou ângulo de incidência. β_t é o ângulo entre a parcela transmitida no dielétrico e o negativo do versor normal (\hat{n}). Na

Figura, \hat{s}_i , \hat{s}_r e \hat{s}_t são versores que representam a direção de propagação da onda em \mathbb{R}^3 . Os valores de \vec{A} referem-se às componentes de amplitude do vetor campo elétrico, coplanar ao plano incidente, A_{\parallel} , e perpendicular, A_{\perp} . Uma condição clássica ocorre na incidência paralela à normal da interface, neste caso, $\beta_i = \beta_t = 0^\circ$, portanto, as equações (12) e (13) tornam-se,

$$R_{\perp, \beta_i=0^\circ} = -R_{\parallel, \beta_i=0^\circ} = \frac{n' - n}{n' + n} \quad (16)$$

Logo, para um dielétrico $n' = 1,5$, a equação (16) resulta em $R_{\parallel, \beta_i=0^\circ} = 0,2$.

Uma maneira de quantificar a reflexão é pela refletividade (ρ), definida como a quantidade de energia refletida em relação ao total incidente, sendo representada pela razão,

$$\rho = \frac{|R|^2}{|A|^2} \quad (17)$$

Então, ao utilizar a equação (17) tem-se que, $\rho_{\parallel, \beta_i=0^\circ} = R_{\parallel, \beta_i=0^\circ}^2 = 0,04$. O que indica uma reflexão de 4% dos raios nesse ângulo de incidência. É importante mencionar que, devido à lei de conservação de energia, 96% dos raios são transmitidos. Então, implicitamente, $\rho + \tau = 1$.

De acordo com Rabl (1985), a radiação solar direta tem natureza não polarizada. Porém, apesar da onda apresentar esse comportamento, os coeficientes de amplitude em $\beta_i \neq 0^\circ$ indicam a polarização parcial da luz solar na interação com superfícies.

As reflexões de Fresnel podem constituir uma importante fonte de perda em sistemas ópticos. Uma solução para mitigar o problema é o tratamento antirreflexivo na superfície do dielétrico. O revestimento consiste em depositar camadas finas de vários dielétricos de índices de refração apropriados, com o propósito de controlar a reflexão na superfície. Uma configuração comum envolve uma única película com espessura óptica igual a um quarto do comprimento de onda ($\lambda/4$), que, por meio de interferência destrutiva entre as ondas refletidas nas duas interfaces da camada, reduz drasticamente a reflexão (SMITH, 1966).

2.6 Reflexão interna total

A reflexão interna total (RIT) é um fenômeno óptico fundamental em interfaces entre meios com diferentes índices de refração. Ocorre na interação entre dois materiais de índices de refração distintos, internamente naquele mais denso. O concentrador é preenchido pelo dielétrico de $n' = 1,5$, o que, sob certos ângulos de incidência, incrementa consideravelmente a absorção na célula, elevando o γ do sistema.

A RIT ocorre quando, dentro do vidro, o ângulo incidente na fronteira dielétrico-ar ($\beta_{i,l}$) ultrapassa o ângulo crítico (β_c) (BORN et al., 1999). Fisicamente, um raio interno em $n' > n$, que incide na interface é parcialmente refletido, permanecendo em n' , e outra parte, transmitida para n - o que satisfaz as equações de Fresnel. Porém, no ângulo crítico ($\beta_{i,l} = \beta_c$), o ângulo de transmissão ($\beta_{t,l}$) torna-se tangente à superfície do dielétrico, então, intuitivamente, em ($\beta_{i,l} > \beta_c$), todo o raio é refletido internamente, o que equivale a ($R = 1$).

O limite para a RIT pode ser calculado a partir da Lei de Snell,

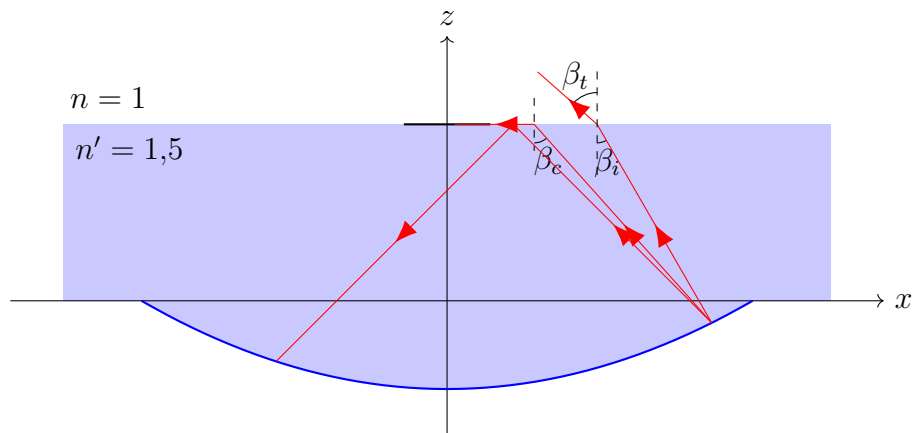
$$n' [\text{sen } \beta_{i,l}]_{\beta_{i,l}=\beta_c} = n [\text{sen } \beta_{t,l}]_{\beta_{t,l}=90^\circ} \quad (18)$$

Organizando a equação (18), resulta na relação entre os índices de refração, então,

$$\beta_c = \arcsen \frac{n}{n'} \quad (19)$$

O efeito da reflexão interna total concentrador está ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – RIT no concentrador.



Fonte: O autor (2025).

Como $n' = 1,5$, resulta em $\beta_c \approx 41,81^\circ$. Portanto, qualquer $\beta_{i,l} > \beta_c$ irá integralmente ser refletido no vidro. O efeito descrito nesta seção é contabilizado na simulação. A metodologia apresenta o modo como isso é realizado, através dos caminhos ópticos descritos.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Esta seção traz um panorama da concentração fotovoltaica, aborda inicialmente o contexto dos sistemas CPV, definindo suas premissas elementares em termos ópticos. Em seguida, realiza-se uma apresentação da energia solar no espaço, com seu histórico e desenvolvimento. Por fim, a última seção trata da aplicação de CPV no espaço, desde os primeiros sistemas até o estado da arte.

3.1 Contextualização dos sistemas CPV

O CPV é utilizada com o objetivo de aumentar a potência por unidade de área, o que implica em menor quantidade de material utilizado e, conseqüentemente, na redução dos custos. Esses sistemas empregam recursos ópticos, através do uso de elementos reflexivos ou refrativos para concentrar a luz solar em um ponto ou linha focal. Assim, representam uma ferramenta de melhoria da eficiência global em relação aos sistemas fotovoltaicos convencionais (KHAMOOSHI et al., 2014).

Dispositivos CPV podem ser classificados quanto ao nível de concentração geométrica, normalmente expresso em “sóis”, que indica o número de vezes que a luz solar é concentrada sobre a célula: de baixa concentração (LCPV), de 1 a 40 sóis; média concentração (MCPV) com 40 – 300 sóis; e a alta concentração (HCPV), obtendo de 300 – 2000× (PÉREZ-HIGUERAS et al., 2011).

No entanto, apesar da proposta promissora, a tecnologia CPV enfrenta desafios como o gerenciamento térmico e rastreamento de alta precisão. A não uniformidade de fluxo de radiação incidente afeta a eficiência das células, devido à ocorrência de pontos de calor, o que leva a perdas de potência no sistema (BARRETO et al., 2024).

Em outro ambiente, como o espacial, o emprego de CPV tem como consequência o surgimento de novos desafios e possibilidades. Diferentemente dos CPVs terrestres, as exigências ópticas são distintas, como também as figuras de mérito para otimização (RUUD et al., 2023). A próxima seção traz um contexto da energia solar no espaço, apresentando um breve histórico e, posteriormente, é realizada uma análise na aplicação de CPV no espaço.

3.2 Energia solar no espaço

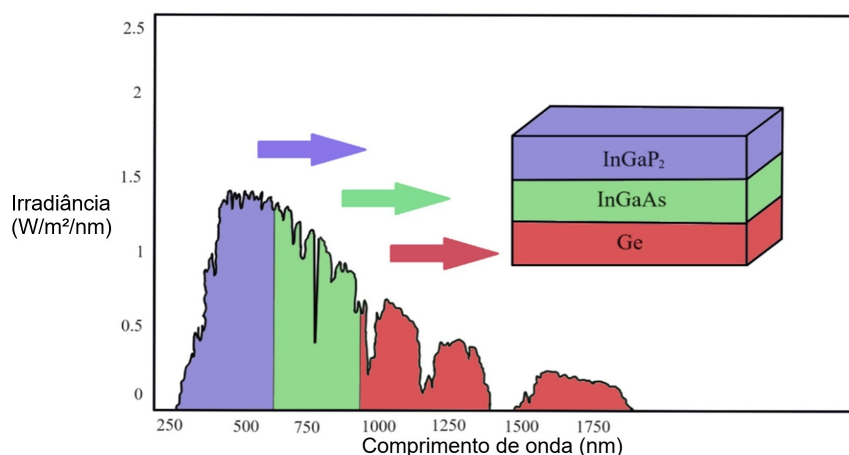
No ambiente espacial, a energia solar constitui a base para a obtenção de potência, sendo uma tecnologia confiável para o suprimento de dispositivos espaciais. A energia solar acompanha a história da aplicação espacial, sendo empregada desde o início da exploração, através das células baseadas em silício, como as utilizadas no satélite *Vanguard 1* (BAILEY; RAFFAELLE, 2010).

O Brasil também possui satélites com o uso de energia solar. O SCD1 e SCD2, são os primeiros representantes da tecnologia nacional, com uso de células fotovoltaicas, construídas em silício. Foram lançados, respectivamente, em fevereiro de 1993 e outubro de 1998, com a função de coletas de dados e experimentos (VEISSID; BARUEL, 2012)(INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 2023).

Com o desenvolvimento da ciência dos materiais e o uso de novas técnicas, foi possível aumentar significativamente a eficiência das células fotovoltaicas, reduzindo a dependência do silício. As células de multijunção (MJ) constituem a referência para aplicação espacial (LI et al., 2021). São fabricadas pela deposição de camadas de distintos semicondutores, no caso da tripla junção (TJ), como por exemplo, as ligas índio-gálio-fósforo (InGaP) e índio-gálio-arsênio (InGaAs), e o germânio (Ge).

Isso permite a conversão da luz solar em uma larga faixa do seu comprimento de onda, pois, cada camada de semicondutor possui um coeficiente de absorção - capacidade de absorção da radiação - adequado para cada intervalo do espectro de luz solar (Figura 8), resultando no alcance de altas eficiências (YAMAGUCHI et al., 2021).

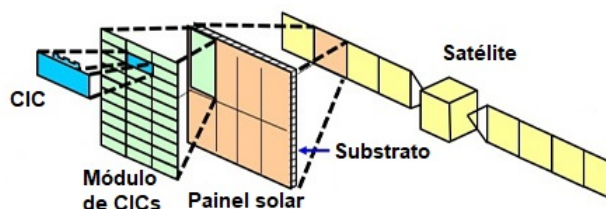
Figura 8 – Absorção da luz solar numa célula de tripla junçã de InGaP₂/InGaAs/Ge.



Fonte: Adaptado de Mouri et al. (2016).

As células MJ são aplicadas em larga escala nos painéis espaciais. Essa configuração é a dominante no espaço, sendo constituídas em “asas” de *arrays* compostos por células MJ que alimentam os satélites em órbita (Figura 9), e são comumente denominados CICs, devido a possuírem uma cobertura de vidro, com fins de mitigação dos danos da radiação espacial.

Figura 9 – Montagem das CICs no satélite.



Fonte: adaptado de MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION (2025).

Apesar de ser a primeira escolha para aplicação espacial, altos custos, décadas de otimização que aproximam os CICs de seus limites e falhas que impactam o desempenho do sistema (RUUD et al., 2023; RODGERS et al., 2024; ZHANG et al., 2024) motivam a busca de novas alternativas de configurações para suprir a crescente demanda de potência na exploração espacial (LUMB et al., 2016; RUUD et al., 2019; VOARINO et al., 2019; RUUD et al., 2022).

As células MJ também enfrentam desafios. A complexidade do processo de fabricação aumenta consideravelmente os custos, o que tem constituído o principal desafio dessa tecnologia. Assim, novos materiais surgem como alternativas à aplicação espacial, como a perovskita (BAIJU; YAREMA, 2022; VERDUCI et al., 2022)

A próxima seção detalha a concentração fotovoltaica com aplicações no espaço. É traçado um breve histórico da tecnologia até o estado da arte, com os desafios e oportunidades que essa tecnologia apresenta.

3.2.1 O CPV no espaço

O histórico do CPV no espaço é longo, com a realização de diversas tentativas já realizadas. Sua atratividade, devido a alta eficiência aliada ao baixo custo, sempre despertou o interesse para a aplicação espacial (ALLEN et al., 1996). Entretanto, diversos fatores contribuíram para o insucesso, como configuração óptica inadequada, gerenciamento térmico ineficiente e falhas decorrentes de considerações insuficientes do ambiente espacial, como a degradação provocada pela elevada radiação extraterrestre e o vácuo (BAILEY; RAFFAELLE, 2010; KESER; ÍDARE, 2019).

Os desafios do ambiente espacial são um dos fatores-chave para o fracasso de CPVs passados. Várias são as etapas de teste necessárias para a verificação da confiabilidade desses sistemas para uso em ambiente real. Essa tecnologia mostra-se fortemente dependente de novas configurações ópticas, que são um fator crucial, devido à elevação da eficiência nas células fotovoltaicas (KESER; IDARE, 2019). Além disso, o desenvolvimento de novos materiais e técnicas mostra-se fundamental para a concentração fotovoltaica, permitindo a sua execução em maior escala (SHANKS et al., 2016).

A seção seguinte detalha esses desafios, abordando as diferenças entre o ambiente espacial e terrestre. Ademais, são descritos os requisitos necessários, explorando os conceitos-chave de análise, que tornam viável sua execução no ambiente espacial.

3.2.1.1 Desafios e restrições

O ambiente espacial impõe condições diferentes das terrestres. Devido à necessidade de incluir erros de rastreamento, distorções térmicas e vibrações estruturais, o ângulo de aceitação deve ser $\geq 5^\circ$ (RUUD et al., 2023), o que, de acordo com o limite termodinâmico (equação 4), limita a concentração, em termos práticos, a valores inferiores a 100. Essa concentração é bem menor que a buscada nas aplicações terrestres, que almeja a HCPV (PÉREZ-HIGUERAS et al., 2011; WIESENFARTH et al., 2017).

Devido à importância de minimizar a massa nos lançamentos e nos sistemas de propulsão de dispositivos espaciais, torna-se vital que qualquer sistema solar no espaço possa entregar alta potência por unidade de massa (W / kg). Portanto, a concentração solar surge como uma possibilidade, pois entrega potência com a necessidade de menor área de material. No contexto do μ CPV, reduzir a razão de aspecto (AR) é um dos caminhos para lograr esse objetivo.

3.2.1.2 Oportunidades e perspectivas

Reduzir a escala da célula PV é um dos avanços possibilitados pelo desenvolvimento da impressão por transferência. Essa técnica permite superar as limitações de CPVs da geração anterior, adotando o mesmo fator de forma dos CICs (RUUD et al., 2023). Ademais, facilita o gerenciamento térmico, devido ao resfriamento passivo (RUUD et al., 2019).

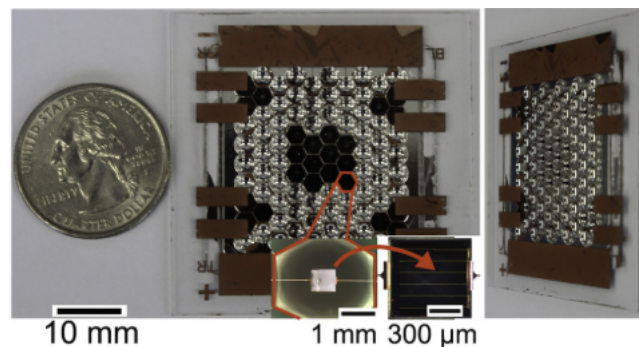
Os μ CPVs podem ser baseados em óptica refrativa ou refletiva. Uma diferença marcante, com base na literatura, percebe-se que o uso de exclusivo de lentes (óptica refrativa), apesar da alta potência específica, tende a possuir um elevado AR , devido à maior distância focal (LUMB et al., 2016; RUUD et al., 2023).

Quanto à sua montagem óptica, a técnica de precisão de moldagem de vidro (PGM, do inglês *Precision Glass Molding*) apresenta vantagens significativas para o dispositivo. A utilização da PGM permite um processo de fabricação mais simples, que garante precisão óptica e alinhamento dos elementos do concentrador, além disso, possui estabilidade térmica superior, devido ao baixo coeficiente de expansão térmica (JOST et al., 2020).

Dada a limitação de trabalhos no estado da arte da tecnologia μ CPV, especialmente em ambientes espaciais, os avanços recentes concentram-se nos estudos de Ruud et al. (RUUD et al., 2019; RUUD et al., 2022). Neste artigo, os autores apresentam um μ CPV de reflexão simples com o emprego do PGM, e indicam que a configuração parabólica apresenta melhor desempenho global.

Nele, consideram os efeitos práticos e validam as simulações por meio da construção de um protótipo (Figura 10) com células MJ de InGaP/GaAs/InGaAsNSb que alcança, sob condições terrestres, um $\theta = \pm 9,5^\circ$ e potência específica de 111 W / kg.

Figura 10 – Protótipo do μ CPV.



Fonte: Ruud et al. (2019).

Na Figura 10, há comparação de tamanho entre a moeda e o protótipo, com os concentradores tendo uma abertura hexagonal (para facilitar sua montagem em conjuntos). Sua ampliação, já na escala de milímetros, exibe um concentrador individual, com o espelho parabólico ao fundo, no centro está a microcélula (com $300\mu\text{m}$).

Em busca de avanços na performance, incluir outro elemento no projeto de Ruud et al. (2022) pode ser uma solução. Um novo espelho plano, definido como secundário, tem a capacidade de aumentar θ , por refletir os raios que seriam desviados do absorvedor sob incidências maiores. Com o novo espelho, o concentrador teria dois estágios de reflexão - dupla reflexão - ao considerar, no traçado óptico, as reflexões no espelho primário e no plano.

A inclusão da microcélula bifacial, posicionada entre o secundário e o primário, é benéfica

nesta configuração, e em conjunto com a óptica de dupla reflexão, permite balancear o fluxo de radiação incidente em ambas as faces da microcélula. Isso possibilita ângulos de aceitação maiores sob maior eficiência óptica.

Essa construção pode ser avaliada a partir do uso de células de perovskita (CaTiO_3). Este é um material que está na vanguarda de tecnologias de células solares, representando um potencial revolucionário. A perovskita destaca-se por possui bom transporte e coleta de cargas, constituindo um oportunidade para utilização em concentração solar, como observado experimentalmente por Leong et al. (2016), também deve-se destacar a sua elevada resistência a partículas de alta energia, menores custos de produção e a baixa massa, tornando-as úteis para missões em satélites (MIYAZAWA et al., 2018)(VERDUCI et al., 2022).

A perovskita vem apresentando fortes avanços, especialmente na aplicação como células solares, com um rápido salto de eficiência, alcançando 25,5% (VERDUCI et al., 2022). Além disso, o desenvolvimento de novas técnicas de engenharia, tem permitido mitigar algumas de suas desvantagens, ao melhorar sua estabilidade e reduzir recombinação não radiativa (ZHANG et al., 2023).

Apesar desses avanços, há os desafios de escalabilidade produtiva, estabilidade e emissão de chumbo. Assim, são necessárias novas pesquisas para melhoria desses aspectos (CORREA-BAENA et al., 2017).

A exploração espacial é uma área em franco crescimento. Perspectivas de missões lunares, operação em ambientes extremos e propulsão elétrica colocam o μCPV como uma alternativa viável para diminuição de custos e a melhora de desempenho em relação aos sistemas solares convencionais (RUUD et al., 2023; GORDON, 2022).

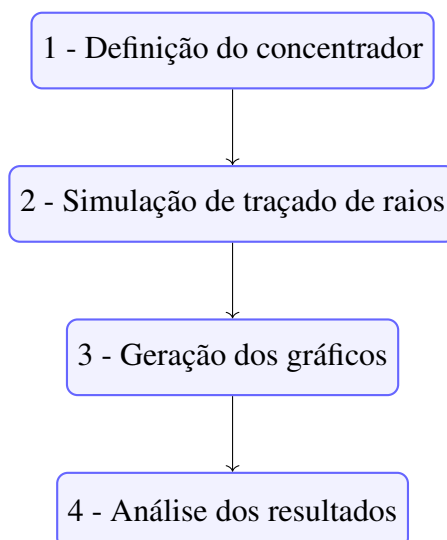
4 METODOLOGIA

Inicialmente, são obtidos os parâmetros do concentrador, como as posições e dimensões dos estágios ópticos. Em seguida, essas informações são utilizadas como entradas para o traçado de raios, que utiliza um código computacional para processar cada caminho óptico dos raios na simulação. A partir disso, os gráficos são posteriormente processados e segue-se para a análise de resultados. As etapas podem ser sintetizadas da seguinte maneira:

1. **Obtenção dos parâmetros do concentrador:** definição do design de interesse, realizado a partir da variação dos parâmetros geométricos. Essa é, portanto, a etapa base para calcular os valores que servirão como entrada para a simulação de traçado de raios. Utilizou-se o *GNU Octave* (EATON et al., 2025) como ferramenta de geração dos pontos do concentrador;
2. **Elaboração de *script* e simulação de traçado de raios:** o código para a simulação de traçado de raios é criado, de modo a captar todo o caminho óptico dos raios. A simulação de traçado de raios é realizada no *SolTrace* (WENDELIN et al., 2013), tendo como entrada os dados obtidos na etapa anterior;
3. **Pós processamento e geração dos gráficos:** os resultados das simulações são plotados, sempre no formato de comparação, entre o fator de interceptação e o ângulo de incidência, sendo exibidos em função da variação dos parâmetros da geometria. Os gráficos são gerados no *GNU Octave*;
4. **Análise dos resultados:** por fim, os resultados são observados, de modo a entender como a mudança nos parâmetros geométricos do concentrados induzem mudanças na sua performance. A sensibilidade dos parâmetros testados são analisados, com o objetivo de estabelecer quais parâmetros são mais sensíveis no desempenho e quais combinações traduzem em melhor eficiência, em termos de fator de interceptação elevados sob ângulo de aceitação largos e baixa razão de aspecto.

As etapas metodológicas podem ser resumidas no seguinte diagrama:

Figura 11 – Etapas.



Fonte: O autor (2025).

4.1 Definições geométricas

Esta seção contextualiza as situações de casos simulados, descrevendo as condições geométricas testadas do concentrador. Aqui são exibidas as formulações matemáticas que representam os casos.

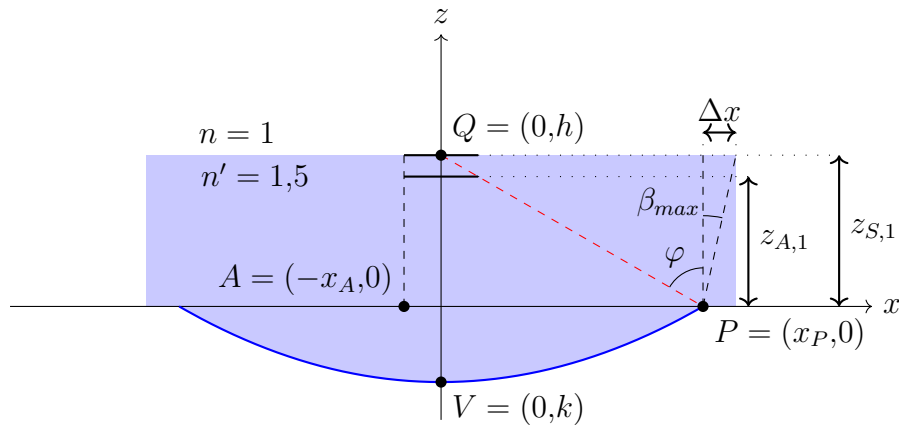
Foi testada uma configuração, o parabolóide circular, na qual sua área de abertura compreende uma circunferência. Esse concentrador foi disposto em duas condições, relativas à posição do secundário, ou altura em relação ao vértice da parábola: fixado no foco do concentrador e, no outro caso, abaixo deste. A análise procedida busca identificar a posição de melhor desempenho do fator de interceptação.

Quanto à sensibilidade, foram realizados três estudos de variação de parâmetros: a distância entre absorvedor e secundário (D_{a-s}); do ângulo de borda do concentrador (φ); e a razão área do absorvedor/área do secundário (A_{abs}/A_{sec}).

4.1.1 O parabolóide circular

O parabolóide de abertura circular é formado pela revolução da parábola em torno do eixo z . A parábola define a superfície do primeiro estágio de reflexão, o espelho primário, que tem a função de direcionar os raios para o secundário, ou diretamente ao absorvedor. A parábola pode ser modelada apenas pelo ângulo de borda (φ) e do seu raio de abertura (x_P) (Figura 12).

Figura 12 – Relações no concentrador.



Fonte: O autor (2025).

O ponto Q representa o foco da parábola, enquanto seu vértice encontra-se abaixo da origem, deslocado em k , no ponto V . De acordo com a Figura 12, a equação da parábola é

$$z - k = \frac{x^2}{4f} \quad (20)$$

f é o comprimento focal, e pode ser expresso como $f = h + |k|$. Para o ponto P , inserindo suas coordenadas na equação (20), encontra-se $k = -x_P^2/4f$. A altura h pode ser obtida pela relação com o ângulo de borda e o raio de abertura, tal que, $h = x_P \cot \varphi$. Inserindo os valores de k , h e f em (20), obtém-se a equação da parábola em função dos parâmetros de interesse,

$$f^2 - (x_P \cot \varphi)f - \frac{x_P^2}{4} = 0 \quad (21)$$

A solução da equação (21) fornece o foco da parábola, tendo como entradas apenas o ângulo de borda e do seu raio de abertura. Uma vez que a parábola tem concavidade voltada para cima, o foco é positivo, logo, a solução de $f < 0$ é descartada. O domínio da parábola deve ser restrito a $[-x_P, x_P]$ para manter a consistência física. Essa curva pode ser sintetizada por,

$$\mathcal{P} : \begin{cases} f = \frac{x_P}{2} (\cot \varphi \pm \operatorname{cosec} \varphi) & f > 0 \\ z = \frac{1}{4f} (x^2 - x_P^2) & -x_P \leq x \leq x_P \end{cases}$$

4.1.2 O secundário e o absorvedor

O secundário constitui o segundo estágio óptico de reflexão, sendo um espelho plano que tem como função principal refletir os raios do primário para a face de cima da microcélula. No

modelo, foi testado seu impacto em γ , quanto à sua posição relativa ao foco e à relação com a área do absorvedor.

A microcélula fotovoltaica consiste no absorvedor do sistema de concentração, portanto, o último estágio. Sendo bifacial, recebe radiação em ambas as faces, e sua posição tem reflexo direto no fluxo de concentração.

4.1.2.1 Posição do secundário e absorvedor

Foi avaliado como a altura do secundário afeta o γ , assim, foi aferida sua posição no foco, e abaixo deste. Com base na Figura 12, considerando o secundário no foco, então, sua altura será $z_{S,1} = h$. Na posição axial, por questões de simetria, tanto o secundário quanto o absorvedor devem estar paralelos à abertura do primário, alinhados ao eixo óptico do concentrador. A microcélula fica abaixo de $z_{S,1}$, sendo que para estabelecer uma métrica, considera-se que um raio que atinge a borda do primário consiga refletir para o centro do secundário, portanto, sua altura será,

$$z_{A,1} = (x_P - x_A) \cot \varphi \quad (22)$$

Conforme a equação (22), o raio do absorvedor toca a linha de φ — linha tracejada em vermelho, na Figura 12. No cenário base, absorvedor e secundário possuem a mesma área ($x_A = x_S$) e têm abertura circular. O raio de abertura pode ser obtido pela concentração geométrica, com $x_A = x_P / \sqrt{C_g}$. Com essa configuração, a razão de aspecto resulta em $AR_1 = (h + |k|) / 2x_P$.

Na outra possibilidade, dispor $z_S < h$ leva a uma compacidade maior que a condição anterior. Neste caso, admite-se uma distância igual entre o foco, secundário e absorvedor, de modo que $d(h, z_S) = d(z_S, z_A)$. Então, é o raio do secundário que é limitado pela linha de φ , portanto, o secundário assume a posição do absorvedor,

$$z_{S,2} = z_{A,1} \quad (23)$$

O absorvedor estará um pouco mais abaixo, em $z_{A,2} = h - 2x_A \cot \varphi$. É notável a redução do tamanho com essa condição, pois $AR_2 = (z_{S,2} + |k|) / 2x_P$.

4.1.3 O dielétrico

O vidro representa o dielétrico, que preenche todo o concentrador, possui índice de refração $n' = 1,5$, e seu limite superior coincide com a posição do secundário (Figura 12). Incluir

esse meio permite uma maior tolerância óptica, garantindo maior estabilidade e precisão ao sistema, especialmente em situações de alta exigência, como no espaço (NING et al., 1987).

Na simulação de traçado de raios, o vidro deve apresentar uma abertura maior que o concentrador, pois, devido à variação do ângulo de incidência, deve abranger a frente de onda máxima, no maior valor do β simulado, permitindo a captação total dos raios que incidem nela. Então, seu raio de abertura (x_L) será,

$$x_L = x_P + \Delta x \quad (24)$$

Por relações trigonométricas na Figura 12, $\Delta x = z_S \operatorname{tg} \beta_{max}$.

4.2 Traçado de raios

Com os resultados obtidos a partir do modelo descrito, os parâmetros de cada condição são importados para o *SolTrace*. No código, cada condição descrita é considerada. Além disso, foram contabilizadas todas as premissas físicas e geométricas. Com o objetivo de manter a precisão da simulação, o algoritmo estabelece condições de verificação para garantir a rigorosidade necessária.

As simulações foram executadas utilizando uma quantidade de 1.000.000 de raios, valor escolhido para reduzir a incerteza estatística (SANCHEZ et al., 2001). Foi adotada uma distribuição gaussiana para o formato efetivo do cone solar, o que é apropriado ao representar sua convolução dos erros ópticos e forma angular — conforme evidenciado por estudos que modelam a irradiância solar efetiva como uma função gaussiana, incluindo sua combinação com imperfeições ópticas, resultando em variação angular total também descrita por uma gaussiana (RABL, 1985).

Os valores base aqui adotados são: $C_g = 50$, $\varphi = 60^\circ$, $D_{a-s} = 1D$ e $A_{abs}/A_{sec} = 1$. Todos esses valores foram selecionados com base na literatura (RUUD et al., 2019). A distância absorvedor-secundária é representada por D_{a-s} , variável, enquanto $D = z_S - z_A$ corresponde à distância base, definida em 4.1.2.1 com entrada de C_g e φ especificados. Esses valores foram selecionados por estarem no intervalo de tolerância para o sistema. Especificamente para C_g , foi escolhido por ser superior ao testado em Ruud et al. (2019), o que é útil pela necessidade de estudar o desempenho sob concentrações mais altas — o que é desejável em sistemas *CPV*.

É importante mencionar que, a utilização da perovskita é apenas uma sugestão para trabalhos futuros, devido à necessidade de avaliação desse material em aplicações dessa classe.

Este trabalho tem o foco apenas na análise óptica do sistema, não avaliando os materiais utilizados no absorvedor.

4.2.1 Considerações físicas e geométricas

Nesta seção, aplicam-se os conceitos físicos discutidos na seção 2, com foco na modelagem computacional e nos parâmetros utilizados nas simulações via *SolTrace*.

4.2.1.1 Equações de Fresnel

Na interface vidro-vácuo, a luz sofre tanto reflexão quanto refração, conforme descrito pelas equações de Fresnel. O *SolTrace* utiliza as equações de Fresnel para calcular a refração e a reflexão. O sistema aqui simulado é utiliza uma idealização das reflexões de Fresnel, então não há perdas por absorção ou reflexão. Conseqüentemente, sob condições ideais, toda a luz é transmitida através do vidro, e somente a perda por sombreamento pelo secundário é considerada, o que mantém as condições do trabalho de Ruud et al. (2019), permitindo uma comparação consistente.

Com essa idealização, o algoritmo considera apenas como raios válidos aqueles que entram no dielétrico. Outrossim, os raios que atravessam o vidro devem atingir algum dos estágios ópticos no interior desta (o primário ou, mais raramente, diretamente o absorvedor).

4.2.1.2 O cone solar

Uma vez que o sol se move, a altura do cone solar varia conforme sua posição. Com essa mudança, é estabelecida uma relação para o seu semiângulo em função do ângulo de incidência (RABL, 1985) por,

$$\Delta s'(\beta) = \Delta_s \sec \beta \quad (25)$$

Na equação (25), Δ_s representa o meio ângulo de abertura do cone solar na incidência $\beta = 0^\circ$. Logo, $\Delta s'$ é o semiângulo corrigido, dada a incidência angular $\beta > 0^\circ$.

Este trabalho usará um $\Delta_s = 4,71$ mrad, com base em (RUUD et al., 2019). Nas aplicações espaciais do sistema, esse é o valor mínimo, pois, devido à ausência dos efeitos atmosféricos, não há as distorções associadas.

Para o desvio do cone (σ_{sol}), foi tomado o valor de sua metade, consistindo numa aproximação da equivalência entre a distribuição gaussiana com a *pillbox*. Portanto, para a geometria circular, tem-se $\sigma_{sol} = \Delta_s/2$ (BIGGS; VITTITOE, 1979).

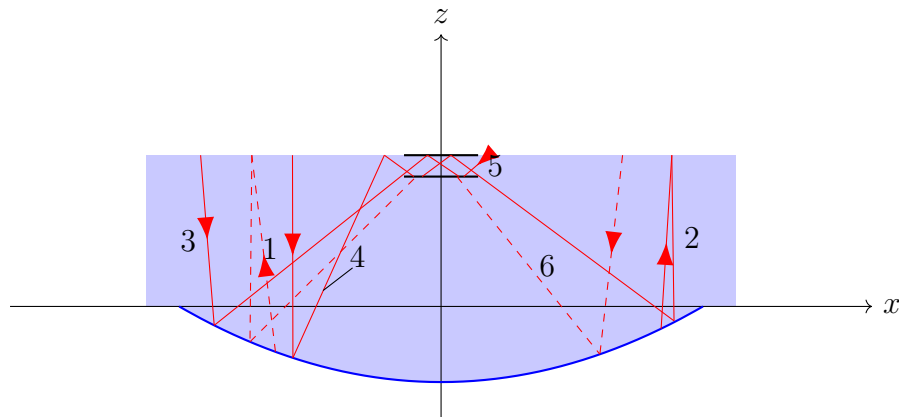
4.2.1.3 Caminhos ópticos

O código executado nas simulações de traçado de raios contabilizou todos os caminhos ópticos possíveis. A lógica utilizou uma estrutura condicional aninhada, de modo a identificar todas as possibilidades existentes no sistema avaliado. Para garantir isso, foram utilizados mecanismos de comparação entre os raios que interceptam o absorvedor e a soma dos raios que atingem a célula por cada caminho óptico.

Nesses caminhos (Figura 13), é possível perceber o efeito físico da RIT. Assim, foram identificados os seguintes caminhos, sendo agrupados de acordo com a respectiva face que intercepta no absorvedor:

1. É uma múltipla reflexão com RIT, nela a reflexão ocorre entre o primário e vidro, até atingir, por fim, a face inferior da célula PV. Logo, pode ser resumido da seguinte maneira, γ_{P1} : ...Primário \rightarrow Dielétrico \rightarrow Primário \rightarrow Absorvedor;
2. Neste outro caminho, também há múltipla reflexão e RIT. A interação final, no entanto, ocorre na face de cima do absorvedor, γ_{P2} : ...Primário \rightarrow Dielétrico \rightarrow Primário \rightarrow Secundário \rightarrow Absorvedor;
3. Aqui, ocorre a **dupla reflexão clássica**, quando os raios provenientes do secundário pela reflexão do primário atingem a face de cima do absorvedor. Portanto, γ_{P3} : Dielétrico \rightarrow Primário \rightarrow Secundário \rightarrow Absorvedor;
4. Nesse traçado de múltipla reflexão, os raios refletem do primário para a borda do dielétrico, que por sua vez, são direcionados para a face de cima do absorvedor por RIT. Logo, γ_{P4} : ...Dielétrico \rightarrow Primário \rightarrow Dielétrico \rightarrow Absorvedor;
5. Há outro caminho, quando em $\beta > 0^\circ$ (mais frequente sob ângulos de incidência mais elevados), o raio transmitido no dielétrico alcança diretamente a face de cima da célula, γ_{P5} : Dielétrico \rightarrow Absorvedor;
6. Neste último traçado, há apenas uma reflexão (**reflexão simples**), do primário diretamente à face inferior do absorvedor, γ_{P6} : Dielétrico \rightarrow Primário \rightarrow Absorvedor.

Figura 13 – Traçados ópticos possíveis no concentrador.



Fonte: O autor (2025).

Nos caminhos ópticos listados, o uso de “...” indica uma interação anterior com alguma das superfícies do sistema. Devido à complexidade das trajetórias e à elevada quantidade de interações possíveis, esses caminhos foram limitados, garantindo o recurso computacional disponível para a compilação do código.

Adicionalmente, ao segmentar cada caminho óptico — incidência direta, reflexão em espelhos, múltiplas interações, RIT —, foi possível isolar e analisar separadamente os fenômenos físicos envolvidos (espalhamento, perdas, desvio angular), proporcionando maior entendimento de como cada componente impacta a performance global do sistema.

Assim, o fator de interceptação também pode ser calculado em função desses traçados, sendo subdividido em dois componentes, γ_1 , dos raios que atingem a face de cima do absorvedor,

$$\gamma_1 = \gamma_{P2} + \gamma_{P3} + \gamma_{P4} + \gamma_{P5} \quad (26)$$

E γ_2 , que contabiliza os raios na face inferior da microcélula,

$$\gamma_2 = \gamma_{P1} + \gamma_{P6} \quad (27)$$

Na Figura 13, a trajetória dos raios de γ_1 é representada pela linha vermelha sólida, enquanto a de γ_2 , pelas linhas tracejadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todos os resultados aqui exibidos partem de parâmetros base, tomando valores de referência para a concentração geométrica, ângulo de borda, distância entre absorvedor e secundário, e razão entre as áreas do absorvedor e secundário. A mudança desses valores ocorre apenas quando mencionado, justamente nas análises de sensibilidade de D_{a-s} , φ e variação do tamanho do secundário (influenciando a razão A_{abs}/A_{sec}).

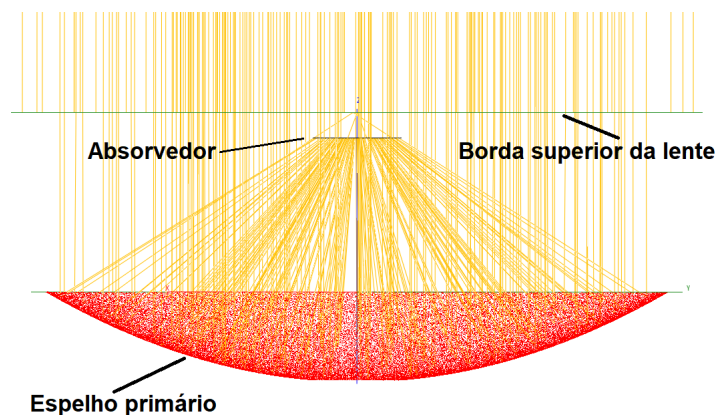
5.1 Geometria simétrica

Nesta seção será discutido o comportamento do fator de interceptação em função do ângulo de aceitação para os três casos:

- A variação da distância entre absorvedor e secundário;
- Sob distintos ângulos de borda do concentrador, com intervalo entre $53,13^\circ$ a $83,13^\circ$;
- E o aumento da área do secundário, de acordo com a razão entre as áreas do absorvedor e do secundário.

Todas as simulações foram tomadas em dois cenários de posição do secundário: no foco (Figura 14) e abaixo. É importante salientar que as simulações desta configuração podem ser comparadas com o trabalho de Ruud et al. (2019), que realizou a mesma análise para diversas configurações geométricas, apenas em casos simétricos.

Figura 14 – Simulação com ângulo de incidência normal ao concentrador.



Fonte: adaptado do SolTrace (2025).

De modo geral, a posição do secundário no foco resulta em ângulos de aceitação mais largos. Posicionar o secundário abaixo do foco diminui a razão de aspecto, porém, há uma perda relevante de θ . Outro comportamento a ser notado é a inversão de contribuições (γ_1 e γ_2) com a variação da posição do secundário.

A Figura 14 apresenta a simulação óptica para $\beta = 0^\circ$ no ambiente do *SolTrace*. Os estágios do sistema são destacados por cores: o espelho primário em vermelho, o absorvedor em preto e o refletor secundário posicionado logo acima, na mesma altura do dielétrico (representada pela linha horizontal verde) e sobreposta por ela. A trajetória dos raios é representada por pontos sobre as superfícies, indicando os locais de interação. Assim, quanto maior a densidade de pontos, maior o número de interações simuladas, o que implica em uma simulação mais precisa.

5.1.1 Distância absorvedor - secundário

O primeiro objeto de análise consistiu em fixar o secundário no foco e variar a distância entre este e o absorvedor (D_{a-s}). O resultado (Figura 15) avalia o fator de interceptação em função do ângulo de aceitação, exibindo diferentes curvas para cada distância simulada. Essas simulações tomam valores fixos para a concentração geométrica, com $C_g = 50$, do ângulo de borda, $\varphi = 60^\circ$, que resultam na razão de aspecto $AR = 0,43$.

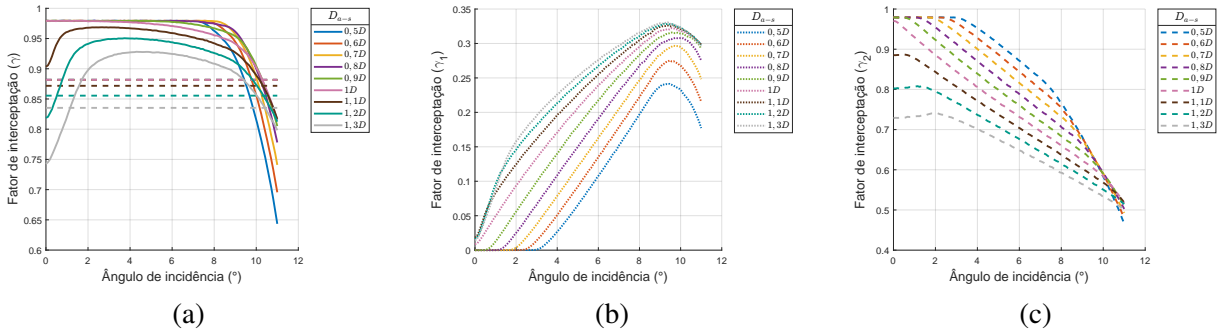
A distância que apresenta melhor desempenho em aceitação angular é a base ($1D$), portanto, para a posição do absorvedor descrito pela equação (22). Nesta curva (Figura 15a), o ângulo de aceitação alcança uma tolerância considerável, $\theta = 10,29^\circ$, para um $\gamma > 0,88$. É interessante notar que entre $0,5D \leq D_{a-s} \leq D$, as respectivas linhas de $0,9\gamma_{max}$ coincidem, sendo, portanto, sobrepostas.

Outros valores, para $D_{a-s} \geq 0,7D$, também alcançam aceitação significativa, com $\theta > 10^\circ$. Em $D_{a-s} = 0,9D$, resulta numa aceitação apenas $0,01^\circ$ menor que a curva base, porém, traz um ganho de desempenho máximo de $> 1,3\%$, com desempenho levemente superior ($\gamma_{0,9D} - \gamma_{1D} > 0,001$) entre uma incidência $3^\circ \leq \beta \leq 10,14^\circ$. Devido a isso, a curva base apresenta um início de queda de γ mais adiantado, resultando num desempenho suavemente inferior a partir deste ponto, em relação a distâncias menores, com diferença máxima para $D_{a-s} = 0,7D$. Essa comparação é compensada pelo ângulo de aceitação, que cai à medida que a distância diminui.

Por definição, selecionar a curva de distância base representa a melhor aceitação angular. Porém, dada a minúscula diferença de aceitação para 90% da distância $1D$ e a faixa angular em que ela compreende desempenho superior, pode ser interessante realizar essa escolha,

dependendo, claro, dos requisitos exigidos no projeto.

Figura 15 – Avaliação da distância absorvedor-secundário - D_{a-s} (no foco): (a) fator de interceptação total; (b) dos raios que atingem a face superior do absorvedor; e (c) na face inferior.



Fonte: o autor (2025).

Conforme visualizado (Figura 15a), curvas com $D_{a-s} > D$ são descartadas, pois apresentam menor aceitação angular sob menor γ de pico. Uma exceção é a distância $D_{a-s} = 1,1D$, neste caso, resulta em $\theta = 10,31^\circ$, levemente superior à distância base. Sua escolha, no entanto, não se justifica devido à elevada perda de raios interceptados — principalmente na incidência normal, quando $\gamma_{1D} - \gamma_{1,1D} \approx 0,06$ —, o que constitui uma queda significativa de desempenho em quase toda incidência angular.

Entender as parcelas de contribuição de γ pode ser revelador, já que permite conhecer a quantidade de raios que interceptam cada face da microcélula (Figura 15b e 15c). O comportamento de γ_1 (Figura 15b) evidencia que maiores distâncias resultam numa interceptação mais relevante na face de cima do absorvedor, isso ocorre porque, com o absorvedor numa posição mais baixa, uma maior quantidade de raios é direcionada ao secundário, sem atingir sua face inferior (diminuindo γ_2).

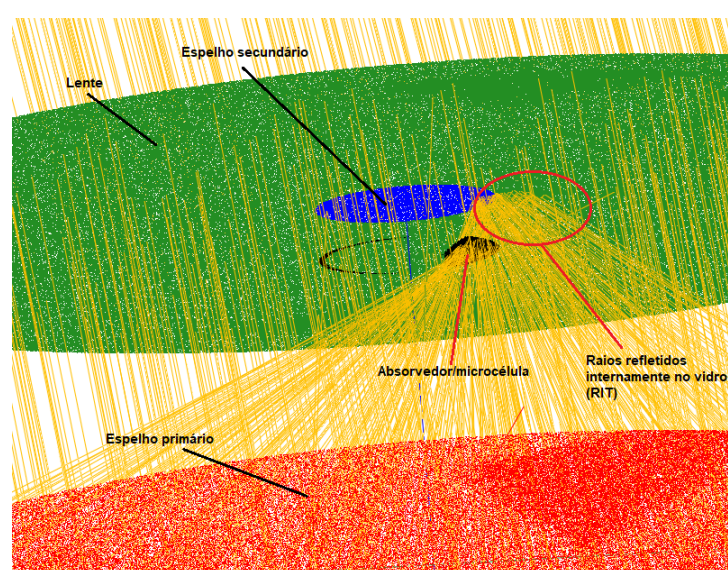
Na Figura 15c, percebe-se que γ_2 é inversamente proporcional à γ_1 , isso devido à observação anterior. Nessa Figura γ_2 diminui com o incremento de β , pois, em ângulos de incidência maiores, mais raios atingem o secundário ou o limite do dielétrico antes de interceptar o absorvedor — este último por RIT.

Há RIT em dois traçados (ver Figuras A-11a e A-12a do apêndice A), contribuindo com γ_2 e γ_1 , porém com interceptação insignificante, na ordem de 10^{-4} . Há, no entanto, um caminho com RIT que apresenta forte influência em γ_1 : γ_{P4} , nele, sob ângulos de incidência elevados, a interceptação cresce fortemente pelos raios que são refletidos internamente na borda do dielétrico, sendo direcionados ao absorvedor em sua face superior, representando até $> 55\%$ o fator de

interceptação desse lado.

É de se destacar a relevante contribuição que a RIT fornece para γ_1 , devido a que a reflexão dupla apresenta máximo na faixa $6^\circ \leq \beta \leq 8^\circ$ (Figura A-13a do apêndice A), e, após esse intervalo, apresenta queda contínua. Assim, apenas ela não seria suficiente para manter γ_1 crescente com o aumento da incidência solar. Pode-se, portanto, afirmar que a RIT contribui de modo a aumentar a aceitação angular do concentrador, permitindo manter γ_1 crescente, apesar da queda da parcela proveniente de interceptação pela reflexão dupla sob β mais elevados. O efeito da RIT pode ser visualizado na Figura 16.

Figura 16 – RIT para a distância de $D_{a-s} = 1D$ sob $\beta = 9,66^\circ$.



Fonte: adaptado do SolTrace (2025).

Resta ainda mencionar um outro caminho óptico presente nesta configuração: o γ_{P5} (ver Figura A-15a do apêndice A). Esse traçado também apresenta discreta incrementação no fator de interceptação da face de cima, de magnitude de 10^{-3} . Conforme o ângulo de incidência aumenta, mais raios provenientes diretamente da borda do dielétrico atingem a microcélula. Seu efeito também pode ser verificado na Figura 16, em que as fronteiras do absorvedor, em seu lado esquerdo, aparecem mais destacadas (em preto), indicando maior interceptação de raios.

Posicionar o secundário abaixo do foco leva a um $AR = 0,39$. A primeira diferença marcante é a convergência de valores de γ pico (Figura 17a), resultando na sobreposição das linhas tracejadas horizontais. Aqui, o melhor desempenho em termos de ângulo de aceitação ocorre em $D_{a-s} = 1D$, com $\theta = 7,11^\circ$.

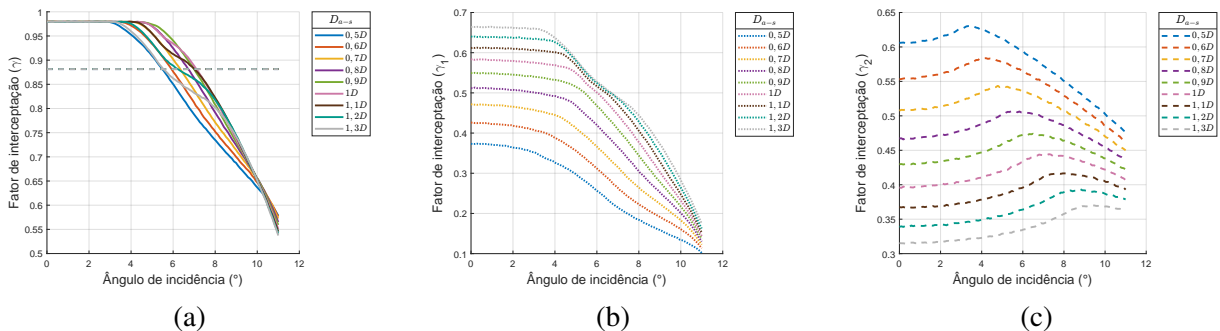
Além disso, a Figura 17a mostra que existe um distinto padrão de inclinação de queda em $D_{a-s} \geq 1D$, levando a uma desaceleração das curvas nessas distâncias. Por causa disso, o

ângulo de aceitação da distância base é maior que $D_{a-s} = 0,9D$ com um $\theta = 6,99^\circ$, pois, apesar da curva referência ter menor interceptação em incidências ($5^\circ \leq \beta \leq 6^\circ$), esta rapidamente ultrapassa a curva de distância ligeiramente inferior com o aumento da incidência.

O efeito verificado ocorre por uma combinação de fatores em γ_1 e γ_2 : em γ_1 (ver Figura 17b), há uma convergência das curvas em $D_{a-s} \geq 1,1D$, o que coincide na desaceleração da queda de γ na Figura 17a, e logo após esta convergência, as curvas descritas apresentam uma ligeira redução na taxa de queda, contribuindo para reduzir o valor total da interceptação (γ).

Além disso, o efeito em γ_2 revela-se ainda mais significativo: na Figura 17c, é possível perceber que, enquanto distâncias menores que a base apresentam diferenças entre o valor final ($\gamma_{2,f}$) e inicial ($\gamma_{2,o}$), tal que $\gamma_{2,o} < \gamma_{2,f}$ — com essa diferença se intensificando quanto menor a distância, devido à maior taxa de queda com o aumento de β em distâncias menores — em $D_{a-s} \geq 1D$ o efeito é o contrário. Nesse caso, γ_2 aumenta proporcionalmente a β , e novamente, a inclinação é mais forte justamente no intervalo que há a desaceleração de γ . Aqui, γ_2 reduz-se apenas a atuação da reflexão do primário, através do caminho γ_{P6} , disponível na Figura A-26a do apêndice A.

Figura 17 – Avaliação da distância absorvedor-secundário - D_{a-s} (abaixo do foco): (a) fator de interceptação total; (b) dos raios que atingem a face superior do absorvedor; e (c) na face inferior.



Fonte: o autor (2025).

O estudo dos caminhos ópticos com o secundário nessa posição demonstra que há diferenças em relação à posição coincidente no foco, as mais marcantes são as ausências de contribuição dos caminhos γ_{P1} e γ_{P2} (ver Figuras A-21a e A-22a do apêndice A). Dessa maneira, a análise de traçados nessa condição simplifica-se, reduzindo os caminhos quase à metade: nas reflexões simples, duplas, na refração direta dielétrico-absorvedor e na RIT mais significativa, γ_{P4} .

Na Figura 17b, percebe-se que, em relação a 15b, γ_1 apresenta uma influência mais

pronunciada no valor de γ , especificamente para $\beta < 4^\circ$ e sob $D_{a-s} \geq 0,9D$. Destrinchar γ_1 em γ_{P3} , γ_{P4} e ainda, embora de modo muito diminuto, γ_{P5} , permite compreender a causa desse comportamento.

Ao contrário do caso com o secundário no foco, se o secundário desce, implica que a dupla reflexão exerce forte peso (ver Figura A-23a do apêndice A) em $\gamma_1 - \gamma_{P3}$ com pico em $\beta = 0^\circ$ e então decaindo com o aumento da incidência — pois o secundário irá captar os raios que seriam direcionados ao foco (ou ao redor dele, quando $\beta \neq 0$), e assim, refleti-los para o lado de cima da microcélula. Além do mais, a RIT em γ_{P4} (Figura A-24a do apêndice A) também é mais relevante, alcançando maior valor de pico e existindo, mesmo na incidência paralela ao eixo óptico. Dessa forma, γ_{P3} e γ_{P4} atuam firmemente em manter γ_1 alto em larga faixa angular de incidência.

Também, quanto ao balanceamento de radiação nas superfícies da microcélula, em geral, o secundário no foco apresenta variações mais bruscas de γ_1 e γ_2 (a diferença entre eles) em diferentes incidências, o que sugere um menor equilíbrio entre as intercepções em cada face. Com o secundário mais abaixo, essa diferença diminui, melhorando o balanceamento entre γ_1 e γ_2 nas faces do absorvedor.

Essa observação é relevante na análise de temperatura da microcélula, mesmo tendo um menor grau de importância no μ CPV, deve-se contabilizá-lo, pois pode ter impacto na eficiência global do sistema, devido a estresses térmicos provocados por gradientes de temperatura.

Em síntese, ao comparar as Figuras 17 e 15, posicionar o secundário no foco proporciona melhor desempenho em termos de eficiência óptica, pois consegue-se obter uma tolerância angular consideravelmente mais alta ($\approx 7^\circ$ abaixo do foco e $\geq 10^\circ$ nele), isso aumenta o tamanho do sistema, levando a uma razão de aspecto suavemente mais alta. No entanto, dado o ganho de θ , incrementar o AR em 10,2% pode trazer benefícios significativos ao desempenho do sistema.

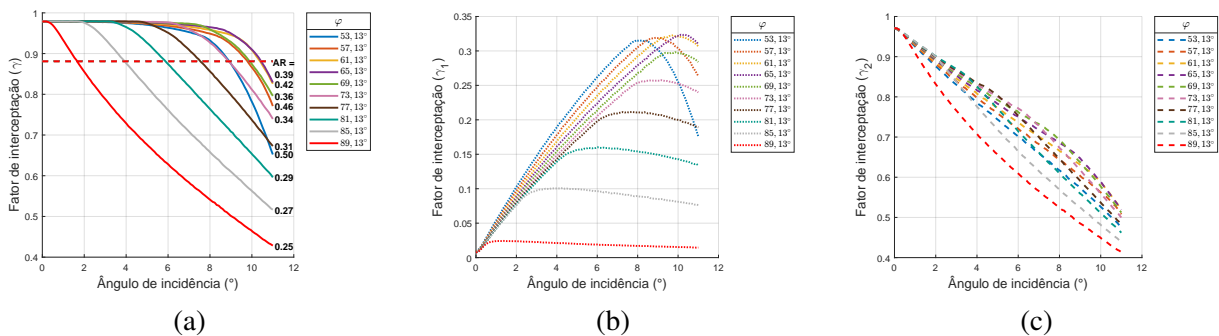
Os resultados obtidos nesta seção são relevantes, pois superam o obtido em Ruud et al. (2019), que obteve um ângulo de aceitação de $\pm 9,4^\circ$, levando em consideração que o trabalho citado utilizou uma concentração geométrica de 25, que representa metade do valor base deste trabalho. Sabe-se que a concentração geométrica e o fator de intercepção são inversamente proporcionais. Então, uma concentração geométrica menor resulta em um absorvedor maior, capaz de captar mais radiação em ângulos de incidência mais elevados.

5.1.2 Variação do ângulo de borda

Um outro fator de mérito no concentrador foi seu ângulo de borda. Nesta primeira verificação, com o secundário no foco (Figura 18a), o melhor desempenho ocorre em $\varphi = 65,13^\circ$, sendo levemente superior ao valor de referência. Esse ângulo de borda combina melhor ângulo de aceitação e razão de aspecto, sendo, respectivamente, $10,43^\circ$ e $0,39$. Na realidade, de modo rigoroso, o melhor ângulo de borda é um valor situado em $61,13^\circ \leq \varphi \leq 69,13^\circ$. O resultado aqui simulado, de $\varphi = 65,13^\circ$, apresentou, portanto, os melhores resultados em termos de compacidade e aceitação angular.

A Figura 18a evidencia que aumentar φ reduz o tamanho do concentrador, devido à diminuição de AR . Essa relação, porém, também conduz a desempenhos inferiores, reduzindo θ . O aumento φ reduz o comprimento focal do paraboloide, o que também reduz a distância base entre o secundário e o absorvedor — pois D depende dessa métrica — implica redução da interceptação nas duas faces do absorvedor (Figuras 18b e 18c), pois, neste caso, a óptica do sistema torna-se mais complexa, devido à menor participação dos caminhos ópticos comuns (reflexão simples e dupla), e ao aumento das múltiplas reflexões e RIT (ver Figuras A-11b e A-12b do apêndice A).

Figura 18 – Avaliação da variação de φ (no foco): (a) fator de interceptação total; (b) dos raios que atingem a face superior do absorvedor; e (c) na face inferior.

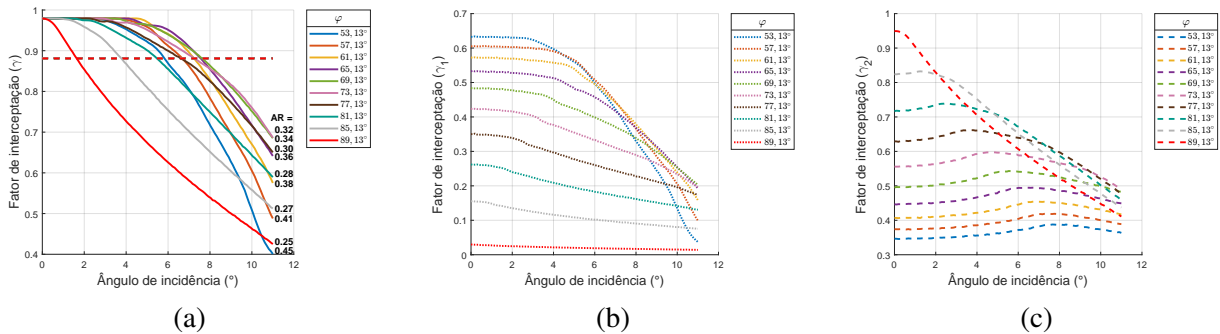


Fonte: o autor (2025).

Na outra condição, diminuindo a altura do secundário, também conduz a resultados semelhantes, devido ao aumento do ângulo de borda em relação ao valor referência. Nesse caso, a Figura 19a deixa claro que valores levemente acima de 60° têm desempenho ótimo. Especificamente, o desempenho superior é alcançado em $\varphi = 69,13^\circ$, com aceitação $\theta = 7,61^\circ$. Sob esta marca, a compacidade atinge $AR = 0,34$. Nas Figuras 18a e 19a, os números em negrito, ao final de cada curva, representam a razão de aspecto associada.

Aqui, pode-se notar a semelhança, sob ângulos de bordas elevados, das curvas tanto abaixo como no foco. Conforme antes mencionado, isso ocorre devido à diminuição de D_{a-s} , que em ambos os casos, de tão pequena, torna-se irrelevante. Esse fato também é a causa da convergência da razão de aspecto em φ próximos a 90° .

Figura 19 – Avaliação da variação de φ (abaixo do foco): (a) fator de interceptação total; (b) dos raios que atingem a face superior do absorvedor; e (c) na face inferior



Fonte: o autor (2025).

Com o secundário abaixo do foco, as conclusões são semelhantes às encontradas com o caso no foco. Concentradores mais compactos — em termos exclusivos do aumento de φ — também resultam em aumento da complexidade dos traçados ópticos. A diferença fundamental consiste no aumento do ângulo de borda ótimo, que é maior quando o secundário está abaixo do foco.

5.1.3 Aumento da área do secundário

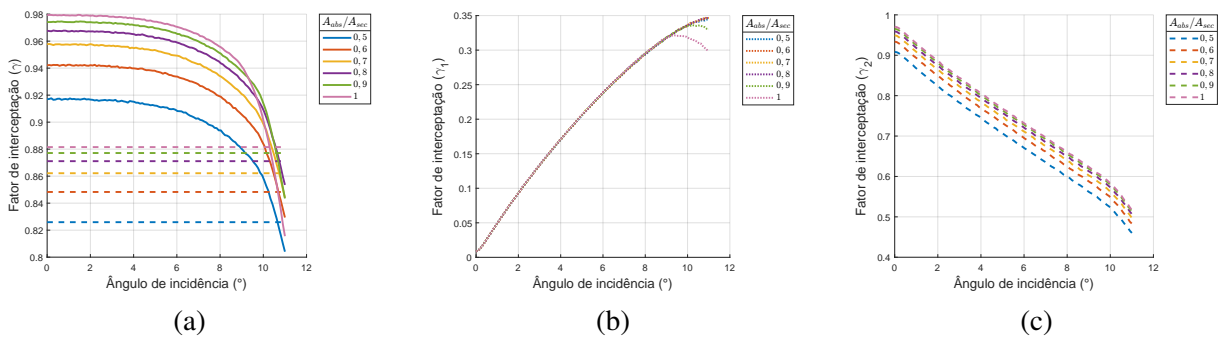
Essa análise de sensibilidade consistiu em verificar o comportamento óptico do sistema com o aumento da área do secundário. A variação da razão A_{abs}/A_{sec} teoricamente traz a redução de γ_{max} , devido ao aumento das perdas por sombreamento. Porém, há uma vantagem nisso, devido à melhora do ângulo de aceitação, pois um secundário maior implica em uma maior área para reflexão dos raios. Assim, esse compromisso busca determinar um tamanho ótimo para o secundário, de modo a avaliar se uma perda mínima de γ_{max} traz benefícios ao sistema, com um aumento justificado de θ .

Na Figura 20a, as curvas comportam-se conforme o esperado. Nelas, θ acompanha o tamanho do secundário, aumentando conforme maior sua área. O ângulo de aceitação máximo ocorre na razão $A_{abs}/A_{sec} = 0,8$, com $\theta = 10,74^\circ$, um ganho de aceitação de $\approx 0,45^\circ$ em relação à razão 1. É visível que há uma perda de γ_{max} , devido ao sombreamento, porém essa diferença,

de cerca de 1% torna-se desprezível, vista a considerável tolerância angular obtida — crucial em sistemas CPVs espaciais.

Entender minuciosamente isso exige observar a interceptação nas faces do absorvedor. Na interceptação na face de baixo, as curvas apresentam um visível paralelismo (Figura 20c), enquanto na parte superior há uma forte convergência até $\beta \approx 9^\circ$ (Figura 20b), quando razões menores se sobressaem, com interceptação crescente e razões próximas de 1 apresentam inflexão de queda.

Figura 20 – Avaliação do aumento da área do secundário (no foco): (a) fator de interceptação total; (b) dos raios que atingem a face superior do absorvedor; e (c) na face inferior



Fonte: o autor (2025).

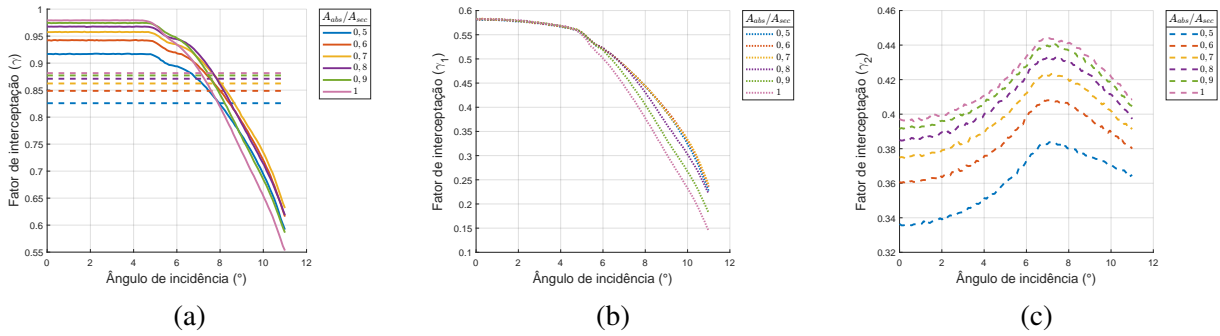
A composição de γ_1 é proveniente principalmente da dupla reflexão clássica (ver Figura A-13c do apêndice A), a RIT também contribui (Figura A-14c do apêndice A), mas em menor medida. Os resultados são coerentes fisicamente, pois, à medida que a razão diminui, a influência da RIT na face de cima também cai e a dupla reflexão aumenta. Esse fator chave do aumento da aceitação angular em secundários mais largos demonstra que, apesar da RIT ser um fator importante, como efeito natural físico para aumento da eficiência do sistema, não é tão efetivo quanto o secundário, que permite refletir todos os raios que incidem nele e não apenas quando o ângulo crítico é alcançado — no caso da reflexão interna total.

Com o secundário abaixo do foco, os resultados (Figura 21a) mostram que o *design* com aceitação maior ocorre em $A_{abs}/A_{sec} = 0,7$, alcançando $\theta = 8,03^\circ$, a diferença com a razão base é ainda mais alta que o caso anterior, de $0,93^\circ$. No entanto, apesar da significativa tolerância angular, a diferença entre as interceptações máximas torna-se maior, com aproximadamente 2,3% do caso referência.

Novamente, nota-se os padrões semelhantes ao caso do foco, como a convergência em γ_1 (Figura 21b) até $\beta \approx 5$ e o paralelismo de curvas (Figuras 21c). Aqui, também é a reflexão dupla clássica (Figura A-23c do apêndice A) a causa de $A_{abs}/A_{sec} = 0,7$ representar melhor curva de

aceitação, sobressaindo-se sobre as demais de maior razão, e, junto às intercepções por RIT (mais forte quando abaixo do foco) e na face inferior, resultam na prevalência dessa razão em γ_1 quando $\beta > 5^\circ$.

Figura 21 – Avaliação do aumento da área do secundário (abaixo do foco): (a) fator de intercepção total; (b) dos raios que atingem a face superior do absorvedor; e (c) na face inferior



Fonte: o autor (2025).

Assim, percebe-se que as simulações obedecem às considerações físicas, vide os efeitos diminuídos da RIT e de raios transmitidos no dielétrico que alcançam diretamente a face de cima do absorvedor (Figura A-25c do apêndice A) devido ao sombreamento provocado por um secundário de maior dimensão.

Além disso, selecionar um secundário maior pode trazer vantagens substanciais de aceitação angular, em troca de uma pequena retração do fator de intercepção, o que é viável diante da aplicação espacial, que requer ângulos de aceitação mais largos.

5.1.4 Resumo dos resultados

Conforme exposto em todas as sensibilidades, o desempenho foi superior ao obtido em Ruud et al. (2019). De fato, o secundário no foco tem melhor performance, apesar do leve aumento da razão de aspecto. É de se destacar que nos cenários base selecionados (D_{a-s} , φ e A_{abs}/A_{sec}) não houve grandes surpresas, sendo próximos aos valores ótimos obtidos. Uma ressalva, no entanto, deve ser feita ao ângulo de borda e à razão de áreas, que apresentaram valores ótimos ligeiramente diferentes dos de base.

A tabela 1 resume os resultados da otimização, exibindo os melhores resultados nas condições da posição do secundário e sob os parâmetros-chave avaliados.

Tabela 1 – Resumo de resultados.

Condição	Melhor valor	θ	AR
No foco/Abaixo	$D_{a-s} = 0,9/1D$	$10,28^\circ/7,11^\circ$	0,43/0,39
	$\varphi = 65,13^\circ/69,13^\circ$	$10,43^\circ/7,61^\circ$	0,39/0,34
	$A_{abs}/A_{sec} = 0,8/0,7$	$10,74^\circ/8,03^\circ$	0,43/0,39

Fonte: o autor (2025).

Conforme a tabela 1, é na variação das dimensões do secundário que o θ apresenta maior sensibilidade. Aumentar o secundário permite que mais raios sejam direcionados por dupla reflexão à microcélula, o que tem como consequência o aumento do ângulo de aceitação. O ângulo de borda também apresenta sensibilidade, embora em menor medida, seu impacto é mais significativo em tornar o concentrador mais compacto, devido à diminuição do AR .

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme exposto, o μ CPV possui vantagens significativas no ambiente espacial, pois, devido ao seu tamanho reduzido, apresenta-se como alternativa para competir com as tecnologias convencionais. A proposta da concentração solar com células em microescala tem o potencial de reduzir custos e aumentar a potência específica para uso no ambiente espacial.

Neste trabalho mostrou-se que é viável, a partir de simulação realizada por traçado de raios, o projeto de um μ CPV de dupla reflexão. Os resultados mostram-se superiores aos observados em Ruud et al. (2019). O ângulo de aceitação alcançou valores $> 10^\circ$, com o espelho secundário posicionado no foco, que é a melhor condição obtida.

Também deve-se destacar que o concentrador continuou ultracompacto, com $AR = 0,39$, isso para uma concentração geométrica de 50. Esses resultados indicam que é possível combinar alta aceitação angular com um design compacto e boa taxa de concentração, o que representa um avanço expressivo no desenvolvimento de microconcentradores para uso espacial.

Além disso, os resultados mostram que, no cenário ótimo de desempenho óptico – secundário no foco –, resulta em um menor balanceamento do fluxo de radiação entre as faces do absorvedor. Essa é uma descoberta relevante, dado que, pode trazer implicações ao desempenho global da microcélula.

Apesar dos resultados promissores, é necessário dar continuidade à pesquisa para aprimorar o desempenho obtido. Entre os próximos passos, destaca-se a necessidade de considerar configurações práticas, como a organização dos concentradores em *arrays*, o que requer simulações com geometrias assimétricas - tal como o paraboloide de abertura quadrada. Além disso, as simulações carecem de validação, então é necessário o desenvolvimento de uma abordagem analítica para estimar a função de aceitação do concentrador.

Ainda, dado a larga exploração de células MJ no ambiente espacial, há a necessidade da avaliação de outros materiais. Conforme observado, a perovskita apresenta propriedades promissoras, com alguns desafios, que, com o passar do tempo, vem sendo mitigados. Sua utilização em ambientes espaciais representa uma área ainda pouco explorada, principalmente em sistemas de concentração solar. Portanto, pesquisas e experimentos nessa direção também devem ser consideradas, com o objetivo de explorar os recursos tecnológicos existentes.

Dado o caráter interdisciplinar do μ CPV, as investigações não devem se restringir apenas à óptica aplicada. Simultaneamente, devido aos desafios e restrições do ambiente espacial, todos os fatores devem ser considerados. Assim, abre-se a porta para estudos de gerenciamento tér-

mico (apesar dos efeitos secundários), comportamentos mecânicos, implicações nos parâmetros elétricos e análise do fluxo de energia incidente na em cada face da microcélula. A avaliação dos impactos de todos esses aspectos deve ser realizada de modo conjunto, por meio de uma otimização multiobjetivo.

Por fim, espera-se que este trabalho possa ter contribuído para o avanço dos μ CPVs, de modo a explorar novos estudos com ênfase na melhora do seu desempenho, e conseqüentemente, redução de custos para futuras missões espaciais.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, D. et al. The scarlet light concentrating solar array. In: **Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1996**. [S.l.: s.n.], 1996. p. 353–356. ISSN 0160-8371.
- BAIJU, A.; YAREMA, M. Status and challenges of multi-junction solar cell technology. **Frontiers in Energy Research**, Volume 10 - 2022, 2022. ISSN 2296-598X.
- BAILEY, S.; RAFFAELLE, R. Space solar cells and arrays. In: _____. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2010. cap. 9, p. 365–401. ISBN 9780470974704.
- BARRETO, I. et al. Concentração fotovoltaica: uma revisão. In: **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético**. [S.l.: s.n.], 2024. p. 807–820.
- BIGGS, F.; VITTITOE, C. N. **Helios model for the optical behavior of reflecting solar concentrators**. [S.l.], 1979. Acesso em: 12/07/2025. Disponível em: <https://pubdocserv.sandia.gov/sand_doc/1976/760347.pdf>.
- BORN, M. et al. **Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1999. ISBN 9780521642224.
- CHAVES, J. **Introduction to nonimaging optics**. Second edition. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. ISBN 9781482206739.
- CORREA-BAENA, J.-P. et al. Promises and challenges of perovskite solar cells. **Science (New York, N.Y.)**, v. 358, n. 6364, p. 739—744, November 2017. ISSN 0036-8075.
- EATON, J. W. et al. **GNU Octave version 10.2.0 manual: a high-level interactive language for numerical computations**. [S.l.], 2025.
- EJAZ, A. et al. Concentrated photovoltaics as light harvesters: Outlook, recent progress, and challenges. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 46, p. 101199, 2021. ISSN 2213-1388.
- FILHO, M. H. de O. P. **Nova abordagem para a determinação da densidade de fluxo solar no absorvedor de concentradores lineares**. Tese (Doutorado em Tecnologia Energéticas e Nucleares) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.
- GORDON, J. M. Uninterrupted photovoltaic power for lunar colonization without the need for storage. **Renewable Energy**, v. 187, p. 987–994, 2022. ISSN 0960-1481.
- GREEN, M. A. et al. The emergence of perovskite solar cells. **Nature Photonics**, v. 8, n. 7, p. 506–514, jul 2014.
- HECHT, E. **Optics**. [S.l.]: Pearson Education, Incorporated, 2017. ISBN 9780133977226.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). 30 anos do satélite scd-1. **Portal Gov.br – INPE**, february 2023. Acesso em: 21/07/2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/inpe/pt-br/assuntos/ultimas-noticias/30-anos-do-satelite-scd-1>>.

INTERNATIONAL SPACE EXPLORATION COORDINATION GROUP (ISECG). **The Global Exploration Roadmap – 2013**. Washington, DC, 2015. Acesso em: 10/07/2025. Disponível em: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/01/ger-2013_small.pdf>.

JOST, N. et al. Molded glass arrays for micro-cpv applications with very good performance. **AIP Conference Proceedings**, v. 2298, n. 1, p. 050003, 11 2020. ISSN 0094-243X.

KESER, Ö. F.; İDARE, B. Concentrated photovoltaic solar power investigation in space application. In: **2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–9.

KHAMOOSHI, M. et al. A review of solar photovoltaic concentrators. **International Journal of Photoenergy**, John Wiley & Sons, v. 2014, 2014. ISSN 1110-662X.

LEONG, W. L. et al. Identifying Fundamental Limitations in Halide Perovskite Solar Cells. **Advanced Materials**, v. 28, n. 12, p. 2439–2445, mar. 2016.

LI, J. et al. A brief review of high efficiency iii-v solar cells for space application. **Frontiers in Physics**, Volume 8 - 2020, 2021. ISSN 2296-424X.

LUMB, M. P. et al. Six-junction (6j) microscale concentrating photovoltaics (cpv) for space applications. In: **2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 3415–3420.

MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. **Solar Array Products (SAP, SAW, SPM)**. 2025. Acesso em: 15/07/2025. Disponível em: <https://www.mitsubishielectric.com/bu/space/satellite_components/solar_array_products/index.html>.

MIYAZAWA, Y. et al. Tolerance of perovskite solar cell to high-energy particle irradiations in space environment. **iScience**, Elsevier Inc., v. 2, p. 148–155, 4 2018. ISSN 25890042.

MOURI, S. P. et al. Theoretical efficiency and cell parameters of alas/gaas/ge based new multijunction solar cell. In: **2016 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6.

NING, X. et al. Optics of two-stage photovoltaic concentrators with dielectric second stages. **Appl. Opt.**, Optica Publishing Group, v. 26, n. 7, p. 1207–1212, Apr 1987.

PÉREZ-HIGUERAS, P. et al. High concentrator photovoltaics efficiencies: Present status and forecast. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 4, p. 1810–1815, 2011. ISSN 1364-0321.

RABL, A. **Active solar collectors and their applications**. [S.l.]: Oxford University Press, New York, NY, 1985.

RODGERS, E. et al. Space based solar power. In: **AIAA AVIATION FORUM AND ASCEND 2024**. [S.l.: s.n.], 2024. p. 4944.

RUCKER, M. A. **Mars Surface Power Generation Challenges and Considerations**. Houston, TX, 2024. Acesso em: 10/07/2025. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2024/01/mars-surface-power-generation-challenges-and-considerations.pdf>>.

RUUD, C. J. et al. Microcell concentrating photovoltaics for space. **Joule**, v. 7, n. 6, p. 1093–1098, 2023. ISSN 2542-4351.

RUUD, C. J. et al. Sine-limiting microcell solar concentrators for space. **Opt. Express**, Optica Publishing Group, v. 30, n. 22, p. 40328–40336, Oct 2022.

RUUD, C. J. et al. Design and demonstration of ultra-compact microcell concentrating photovoltaics for space. **Optics Express**, OSA, v. 27, n. 20, p. A1467–A1480, 2019.

SANCHEZ, M. C. et al. Uncertainty and confidence intervals in optical design using the Monte Carlo ray-trace method. In: FUJISADA, H. et al. (Ed.). **Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites IV**. [S.l.]: SPIE, 2001. v. 4169, p. 190 – 201.

SHANKS, K. et al. Optics for concentrating photovoltaics: Trends, limits and opportunities for materials and design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 394–407, 2016. ISSN 1364-0321.

SMITH, W. J. **Modern Optical Engineering: The Design of Optical Systems**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1966. (Optical and electro-optical engineering series). ISBN 9780070586901.

SOUZA, L. F. L. de. **Concentrador linear fresnel aplanático**. Tese (Doutorado em Tecnologia Energéticas e Nucleares) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

VEISSID, N.; BARUEL, M. F. Energia solar e sua aplicação em satélites. **São José dos Campos-Sp: Sind Ct**, v. 2, 2012.

VERDUCI, R. et al. Solar energy in space applications: Review and technology perspectives. **Advanced Energy Materials**, v. 12, n. 29, p. 2200125, 2022.

VOARINO, P. et al. Microconcentration for space applications: A 7.6x tir design. **AIP Conference Proceedings**, v. 2149, n. 1, p. 050008, 08 2019. ISSN 0094-243X.

WENDELIN, T. Soltrace: A new optical modeling tool for concentrating solar optics. In: **ASME 2003 International Solar Energy Conference**. [S.l.: s.n.], 2003. p. 253–260.

WENDELIN, T. et al. **SolTrace: A Ray-Tracing Code for Complex Solar Optical Systems**. [S.l.], 2013.

WIESENFARTH, M. et al. **Current Status of Concentrator Photovoltaic (CPV) Technology**. [S.l.], 2017. Acesso em: 09/07/2025. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/studie-current-status-of-concentrator-photovoltaic-cpv-technology.html>>.

WINSTON, R. et al. **Nonimaging Optics**. [S.l.]: Elsevier Science, 2005. (Electronics & Electrical). ISBN 9780127597515.

YAMAGUCHI, M. et al. Multi-junction solar cells paving the way for super high-efficiency. **Journal of Applied Physics**, v. 129, n. 24, p. 240901, 06 2021. ISSN 0021-8979.

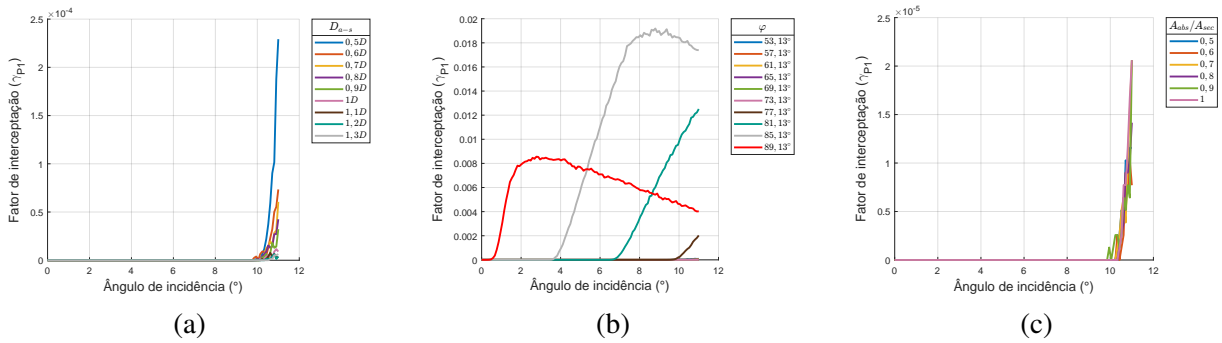
ZHANG, L. et al. Advances in the application of perovskite materials. **Nano-micro letters**, v. 15, n. 1, p. 177, July 2023. ISSN 2311-6706.

ZHANG, Q. et al. Impact of solar cell failure on the performance of solar arrays in space. **Space Solar Power and Wireless Transmission**, v. 1, n. 2, p. 108–114, 2024. ISSN 2950-1040.

APÊNDICE A – CAMINHOS ÓPTICOS

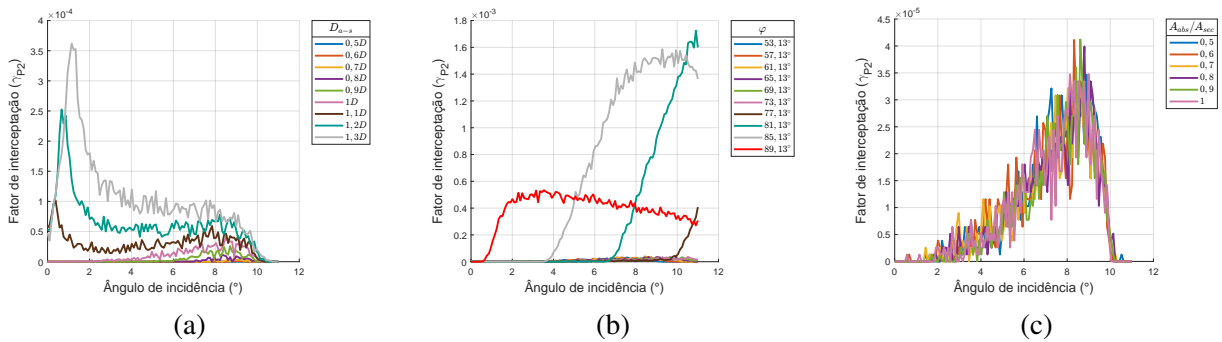
A.1 Paraboloide circular com secundário no foco

Figura A-11 – γ_{P1} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário.



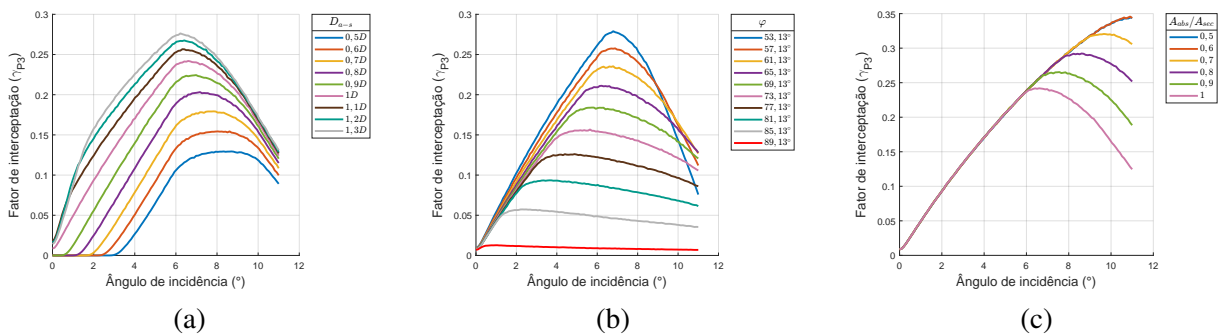
Fonte: o autor (2025).

Figura A-12 – γ_{P2} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário.



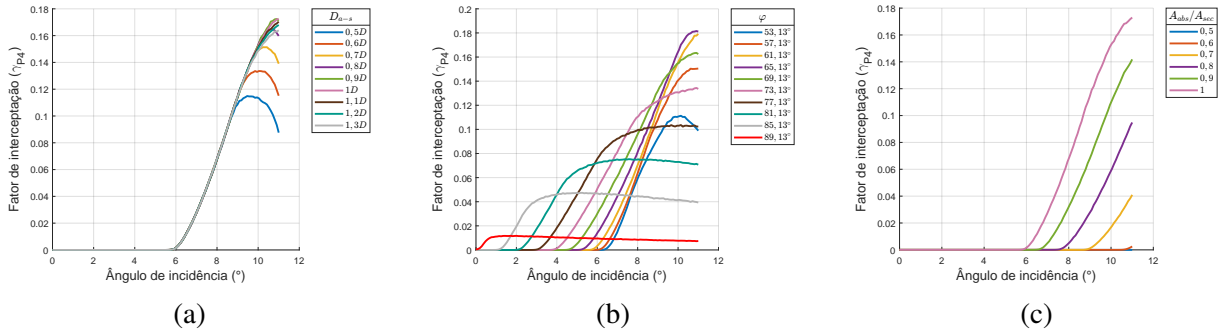
Fonte: o autor (2025).

Figura A-13 – γ_{P3} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário.



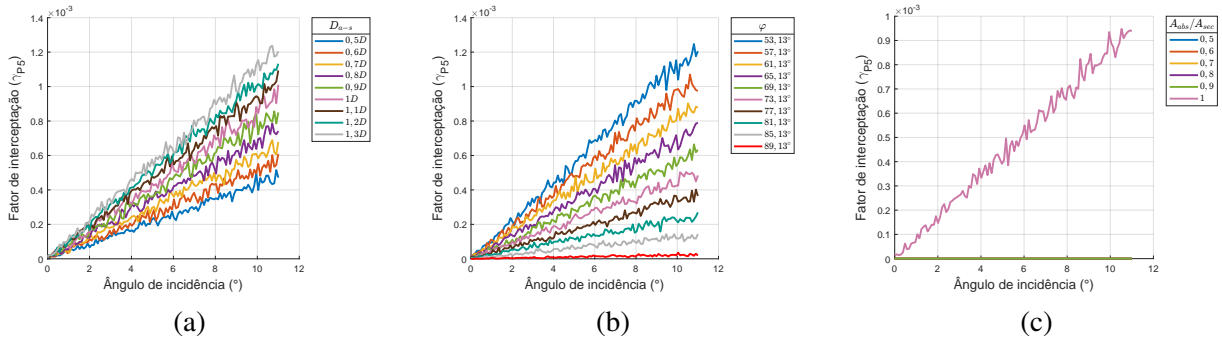
Fonte: o autor (2025).

Figura A-14 – γ_{P4} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário.



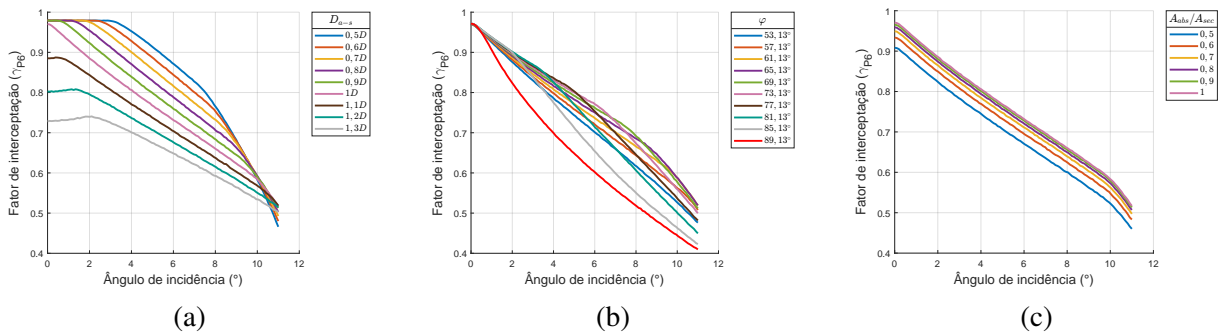
Fonte: o autor (2025).

Figura A-15 – γ_{P5} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário.



Fonte: o autor (2025).

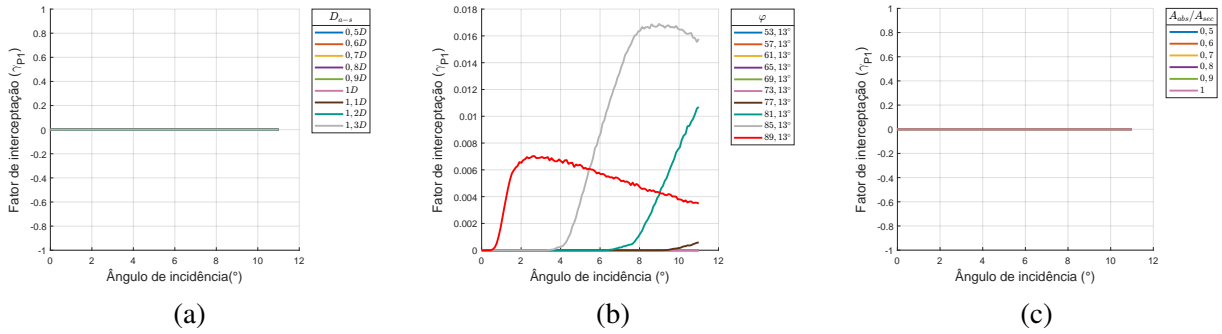
Figura A-16 – γ_{P6} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário.



Fonte: o autor (2025).

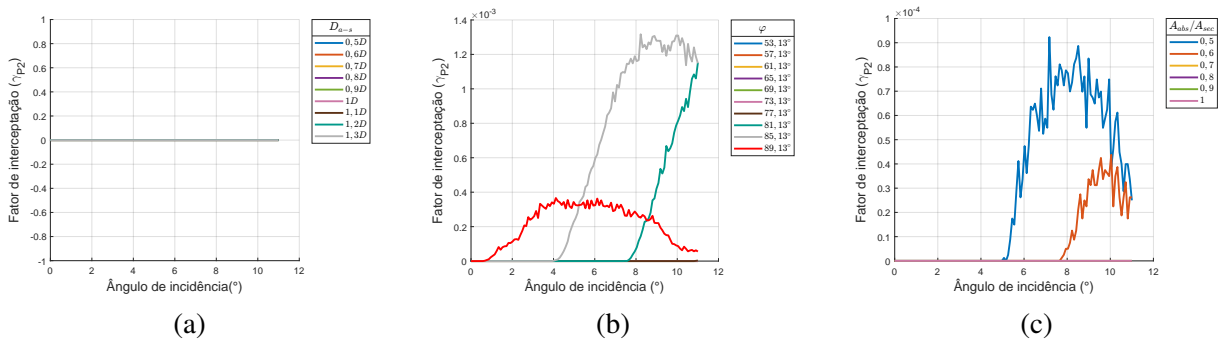
A.2 Paraboloide circular com secundário abaixo do foco

Figura A-21 – γ_{P1} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário.



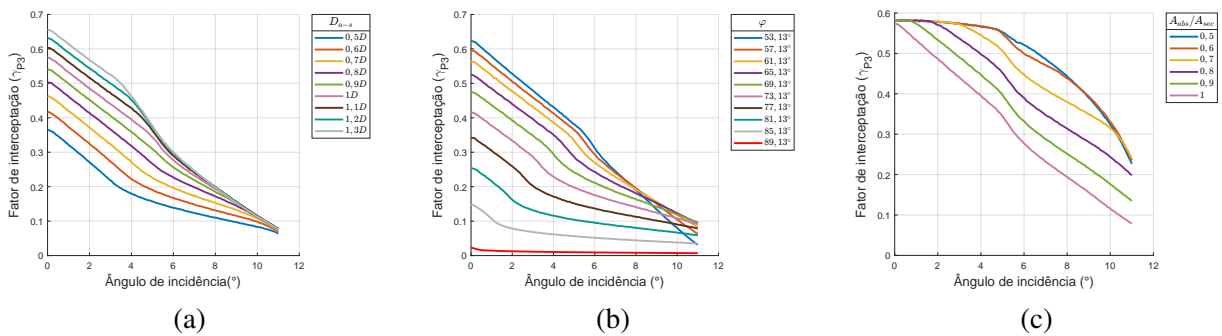
Fonte: o autor (2025).

Figura A-22 – γ_{P2} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário.



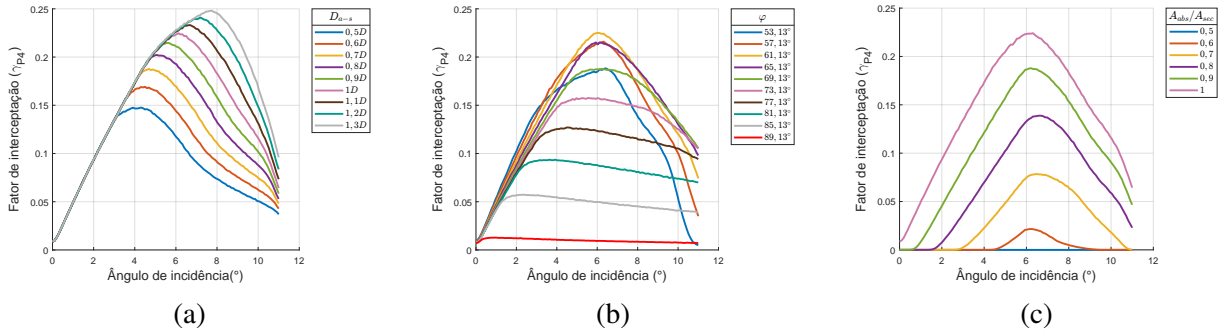
Fonte: o autor (2025).

Figura A-23 – γ_{P3} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário.



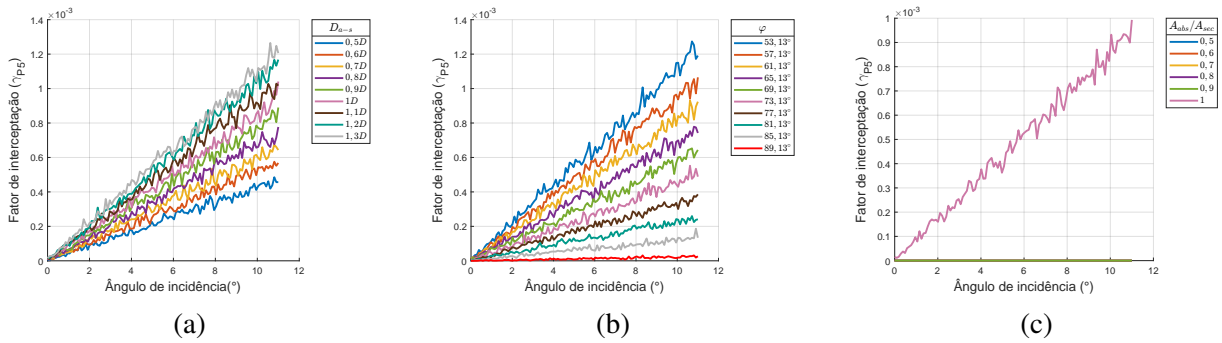
Fonte: o autor (2025).

Figura A-24 – γ_{P4} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário.



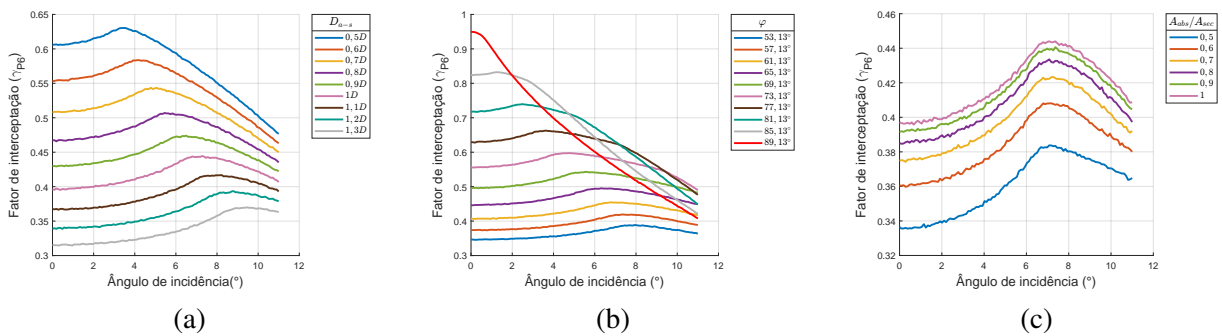
Fonte: o autor (2025).

Figura A-25 – γ_{P5} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário.



Fonte: o autor (2025).

Figura A-26 – γ_{P6} sob as análises: (a) variação da distância secundário-absorvedor; (b) variação do ângulo de borda; e (c) variação no tamanho do secundário.



Fonte: o autor (2025).