



Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Departamento de Física

Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada

**COLETOR SOLAR BASEADO EM GUIAS DE ONDAS**

*Marcos Coelho Ramos*

Dissertação de Mestrado

Recife - PE

30 de Janeiro de 2023

Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Departamento de Física

*Marcos Coelho Ramos*

## **COLETOR SOLAR BASEADO EM GUIAS DE ONDAS**

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada do Departamento de Física da Universidade Federal Rural de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Física Aplicada.

**Orientador: Dr. Diego José Rátiva Millán**

**Recife - PE  
30 de Janeiro de 2022**

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA APLICADA

—

**Marcos Coelho Ramos**

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de mestre em Física, defendida e aprovada por unanimidade em 18/02/2019 pela Comissão Examinadora.

Orientador:

---

Prof. Dr. Diego José Rátiva Millán  
DF - UFRPE

Banca Examinadora:

---

Dr. Diego José Rátiva Millán  
DF - UFRPE

---

Dr. José Ferraz de Mourta de Nunes Filho  
DF - UFRPE

---

Dr. Alexandre de Almeida Prado Pohl  
Departamento de Eletrônica-UTFPR

*"Uma das funções sociais da ciência é a de libertar as pessoas das superstições."*

*(Stevan Weinberg)*

Dedico a Deus, pois sem Ele nada disso seria possível.  
Dedico ao meu orientador Prof. Dr. Diego José Rá-  
tiva Millán, pela confiança, paciência, incentivo, ami-  
zade e excelente orientação.

Dedico também aos meus pais, José Pereira Ramos e  
Maria Resende Coelho, pelo amor, incentivo, cuidado  
e ensinar-me a ser forte e jamais desistir diante das  
dificuldades.

---

# RESUMO

Em virtude do desenvolvimento econômico, os países possuem comum necessidade de recursos energéticos para atender a demanda do setor produtivo. A radiação solar mostra-se como uma alternativa viável na tentativa de suprir essa demanda. Essa fonte energética apresenta-se como promissora por ser abundante, renovável, limpa, inesgotável e de baixo impacto ambiental. O uso de concentradores solares é capaz de aumentar o aproveitamento dessa energia em aplicação fototérmica, parte expressiva da necessidade industrial. Nesse contexto este estudo visa apresentar um novo modelo de coletor solar do tipo concentrador constituído de lentes cilíndricas e guias de ondas desenvolvido em simulação. O processo de simulação ocorreu através do software COMSOL Multiphysics. Os resultados mostraram que o dispositivo apresenta razão de concentração igual a 19,0, eficiência óptica de 94,0% e eficiência térmica de 73,6%. O conjunto de lentes e guias de onda foram construídos em estrutura única em massa e focaliza a luz ao longo de um eixo. O modelo desenvolvido e otimizado possui grande potencial para aplicações fotovoltaica, fototérmica a partir da radiação concentrada.

**Palavras-chave:** Coletor solar concentrador, Eficiência óptica , Fotovoltaica, Fototérmica, Simulação.

---

# ABSTRACT

Due to economic development, countries have a common need for energy resources to meet the demand of the productive sector. Solar radiation is a viable alternative in an attempt to meet this demand. This energy source is promising because it is abundant, renewable, clean, inexhaustible and has low environmental impact. The use of solar concentrators is capable of increasing the use of this energy in photothermal applications, an expressive part of the industrial need. In this context, this study aims to present a new model of concentrator-type solar collector consisting of cylindrical lenses and waveguides developed in simulation. The simulation process took place using the COMSOL Multiphysics software. The results showed that the device has a concentration ratio equal to 19.0, optical efficiency of 94.0% and thermal efficiency of 73.6%. The set of lenses and waveguides are built in a single mass structure and focus the light along an axis. The developed and optimized model has great potential for photovoltaic and photothermal applications based on concentrated radiation.

**Keywords:** Concentrating solar collector, Optical efficiency, Photovoltaics, Photothermal, Simulation.

---

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	O Potencial do Sol . . . . .	1
1.2	Objetivos . . . . .	5
1.2.1	Objetivo Geral . . . . .	5
1.2.2	Objetivos Específicos . . . . .	6
1.3	Escopo e Organização do Trabalho . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>7</b>
2.1	Coletores Solares Aplicação Termossolar . . . . .	7
2.2	Guia de Ondas . . . . .	14
2.3	Fundamentação Teórica . . . . .	20
2.3.1	Modelos Propostos de Concentradores Solares . . . . .	20
2.3.2	Guia de Ondas Maciço . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>44</b>
3.1	Otimização . . . . .	44
3.2	O Modelo . . . . .	49
3.3	Análise Óptica . . . . .	52

<b>4</b>	<b> Materiais e Métodos</b>	<b>59</b>
4.1	Análise Térmica . . . . .	59
<b>5</b>	<b> Resultados e Discussões</b>	<b>63</b>
5.1	Óptica . . . . .	63
5.2	Térmico . . . . .	67
<b>6</b>	<b> Conclusão</b>	<b>73</b>
6.1	Sugestões para Estudos Futuros . . . . .	74
	<b>Referências</b>	<b>88</b>
<b>A</b>	<b> CONSTRUÇÃO DO COLETOR SOLAR BASEADO GUIAS DE ONDAS</b>	<b>89</b>
A.1	Construção de Uma Lente . . . . .	90
A.2	Construção da Geometria do Concentrador Solar . . . . .	96
A.3	Testagem da Trajetória dos Raios e Intensidade da Luz . . . . .	108
A.4	Estudo da absorção Solar . . . . .	122
A.5	Análise Térmica . . . . .	124
A.6	Resultados e Gráficos . . . . .	130
<b>B</b>	<b> Tabelas</b>	<b>134</b>

---

# LISTA DE FIGURAS

1.1	Irradiância solar. Fonte: Adaptado de [5]. . . . .	3
2.1	Subdivisão do processo de revisão sistemática. . . . .	8
2.2	Histograma dos escores da avaliação de qualidade para os concentradores solares. . . . .	9
2.3	Distribuição dos trabalhos selecionados por ano. . . . .	10
2.4	Percentual de trabalhos selecionados por base de dados. . . . .	11
2.5	Percentual de alguns dos modelos de coletores solares. . . . .	12
2.6	Distribuição de artigos selecionados por país. . . . .	13
2.7	Os concentradores cilíndricos parabólicos e linear de Fresnel focalizam a luz ao longo de um eixo. Os concentradores de receptor central e disco parabólico concentram a luz em um ponto. . . . .	14
2.8	Subdivisão do processo de revisão sistemática para os guias de ondas. . . . .	15
2.9	Histograma dos escores da avaliação de qualidade para os guias de ondas. . . . .	16
2.10	Distribuição dos trabalhos sobre guias de ondas selecionados por ano. . . . .	18
2.11	Distribuição de trabalhos por país que tratam sobre guia de ondas. . . . .	18
2.12	Percentual de trabalhos selecionados por base de dados. . . . .	19
2.13	Modelo 3D de concentrador solar AFSC. Fonte: Adaptado de [11]. . . . .	21
2.14	Trajetória da luz do concentrador solar. Fonte: Adaptado de [11]. . . . .	22

2.15	O modelo físico do AFSC com o software Lighttools (a) e traçado de raios para o modelo (b). Fonte: Adaptado de [11]. . . . .	22
2.16	Diagrama esquemático do AFSCFL. Fonte: Adaptado de [12]. . . . .	23
2.17	(a) Diagrama esquemático da trajetória da luz do AFSC e (b) trajetória da luz na lente Fresnel. Fonte: Adaptado de [12]. . . . .	24
2.18	As fotos do AFSCFL em condição experimental. Adaptado de [12]. . . . .	25
2.19	Receptor do AFSCFL. Fonte: Adaptado de [12]. . . . .	25
2.20	Configuração experimental do LFRSC com absorvedor de cavidade trapezoidal. Fonte: Adaptado de [13]. . . . .	26
2.21	Esboço de absorvedores de cavidade trapezoidal para modelagem analítica com placa (a) e sem placa (b). Fonte: Adaptado de [13]. . . . .	27
2.22	Uma vista esquemática do LFRSC com absorvedor de cavidade trapezoidal. Fonte: Adaptado de [13]. . . . .	28
2.23	(a) Concentrador de rastreamento solar linha-a-ponto e (b) seção interna/externa da lente. Fonte: Adaptado de [31]. . . . .	29
2.24	(a) Simulação de traçado de raios linha-a-ponto onde os raios do sol que chegam são colocados perto o PTC para fins ilustrativos. (b) Plano focal aproximado. Fonte: Adaptado de [31]. . . . .	30
2.25	Diagrama esquemático da plataforma de experimentos; e (b) uma foto do Fresnel de foco fixo concentrador solar de lente usando rastreamento de eixo polar. Fonte: Adaptado de [14]. . . . .	31
2.26	(a) Estrutura do sistema de iluminação solar proposto e (b) Configuração experimental. Adaptado de [15]. . . . .	34
2.27	Representação esquemática de um LSC feito de (a) revestido a granel e (b) POFs de núcleo oco com valores de espessura de PMMA de $d \approx 10^{-3}$ m e $d \approx 10^{-4}$ m, respectivamente. Fonte: Adaptado de [34]. . . . .	36

2.28	Fotografias ao ar livre das barras de escala de núcleo oco (a) U6Eu-FWLSCs e (b) U6Rh6G-FWLSCs de $10^{-2}$ m. Ampliação de a extremidade FWLSC de (c, e) U5Rh6G-FWLSC e (d, f) U5Eu-FWLSCs sob condições meteorológicas distintas; barras de escala de $10^{-3}$ m. Fonte: Adaptado de [34]. . . . .	36
2.29	(A) Fotografia de um FWLSC em condições de luz do dia. (B) Esquema da representação da seção transversal. Fonte: Adaptado de [16]. . . . .	37
2.30	Fotografia do FWLSC sob iluminação UV (365 nm). Fonte: [16]. . . . .	38
2.31	O dispositivo de três sistema de guia de onda de lente para canal. Fonte: [17].	39
2.32	(a) Fotografia do guia de onda PMMA que é feito por corte a laser. Fonte: [17].	39
2.33	Os raios de luz incidente, refletido e transmitido estão cada um no plano de incidência. Fonte: Adaptado de [33]. . . . .	40
2.34	Um feixe de luz entra na parte superior esquerda do aquário e, depois, reflete na parte inferior dos espelhos inclinados em diferentes ângulos. Um feixe sofre reflexão interna total na interface ar-água . Fonte: [35]. . . . .	42
3.1	Fluxograma de algoritmo genético. Fonte: [40]. . . . .	45
3.2	Modelo do concentrador solar proposto 2-D. . . . .	46
3.3	Lado esquerdo da geometria a ser otimizada. . . . .	47
3.4	Parâmetros da geometria do concentrador solar a serem otimizados. . . . .	47
3.5	Lente plano-convexa 2-D. . . . .	49
3.6	Lente plano-convexa 2-D com base. . . . .	50
3.7	Sistema com 3.5 lentes 2-D. . . . .	50
3.8	Sistema com 3.5 lentes 2-D. . . . .	51
3.9	Sistema com 7 lentes 2-D otimizado. . . . .	51
3.10	Sistema com 7 lentes e 7 guias de ondas em 3-D otimizado. . . . .	52
3.11	Materiais e dimensões do concentrador solar de 7 lentes cilíndricas. . . . .	53
3.12	Sistema de 3.5 lentes esquerdo do concentrador solar lado lado esquerdo. . .	53
3.13	Malha de elementos finitos do lado esquerdo. . . . .	54
3.14	Sistema de 3.5 lentes (a) e malha de elementos finitos(b) do lado direito. . .	54

3.15	Traçado de raios dos dois sistemas de 3.5 lentes esquerdo (a) e direito (b).	58
5.1	Sistema de 7 lentes não otimizado (a) e otimizado (b).	65
5.2	Análise de direcionalidade dos raios solares incidentes sobre o concentrador solar otimizado e não otimizado.	66
5.3	Traçado de raios para o sistema de 7 lentes 2-D.	67
5.4	Coletor Solar de Absorção Direta (DASC) em três dimensões. Fonte: [50]	69
5.5	Temperatura em função do tempo para o concentrador solar de 3.5 lentes cilíndricas e para o Coletor Solar de Absorção Direta (DASC).	70
5.6	Tubo receptor, temperatura e intensidade luminosa para as partes simétrica da geometria do concentrador solar de 7 lentes cilíndricas.	70
5.7	Distribuição de temperatura para os sistemas simétricos de 3.5 lentes esquerdo (a) e direito (b) em diferentes instantes, do intervalo, de tempo que a água leva para atingi a temperatura de 373 K.	71
A.1	Selecionando " <i>Model wizard</i> "	90
A.2	Selecionando o espeço de dimensões " <i>2D</i> "	90
A.3	Selecionando o módulo de óptica geométrica.	91
A.4	Carregando o módulo de geometria óptica.	91
A.5	Selecionando o módulo de transferência de calor e absorção solar.	92
A.6	Selecionando o módulo de transferência de calor e absorção solar.	92
A.7	Selecionando o estudo.	93
A.8	Selecionando o módulo de traçado de raios.	93
A.9	Modificando a unidade de medida da geometria.	94
A.10	Acessando a biblioteca de modelos/peças prontas.	94
A.11	Área da biblioteca de modelos do Comsol.	95
A.12	Selecionando o modelo de lente de interesse (a) e a variante da peça (b).	95
A.13	Lente conforme os parametros utilizados.	96
A.14	Inserido polígono para construção de uma "base" para a lente.	96

A.15 Tabela de parâmetros do polígono (a), parâmetros e compilação do polígono(b).	97
A.16 Tabela de parâmetros do polígono (a), parâmetros e compilação do polígono(b).	97
A.17 Passos para fazer cópias da estrutura da lente (a) e posições das cópias das lentes (b).	98
A.18 Lentes prontas.	98
A.19 Caule da primeira lente da direita.	99
A.20 Passos para inserção da primeira curva de Bézier para a construção de um caule curvo (a). Parâmetros e compilação da curva de Bézier (b).	99
A.21 Parâmetros da segunda curva de Bézier e compilação.	100
A.22 Polígonos para fechar as extremidades das curvas de Bézier na parte inferior(a) e superior (b).	100
A.23 Parâmetros da terceira (a) e quarta curva de Bézier (b).	101
A.24 Polígonos para fechar as extremidades da terceira e quarta curvas de Bézier na parte inferior(a) e superior(b).	101
A.25 Construção da quinta (a) e sexta curva de Bézier(b).	102
A.26 Polígonos para fechar as extremidades da quinta e sexta curvas de Bézier na parte inferior(a) e superior(b).	102
A.27 Convertendo os polígonos e curvas de Bézier para sólidos maciços.	103
A.28 Caules da lentes prontos.	103
A.29 Inserindo círculo (a) e parâmetros do círculo (b).	104
A.30 Cortando a estrutura da primeira lente da direita.	104
A.31 Selecionando as partes da geometria a serem cortadas.	105
A.32 Selecionando o retângulo para o corte da geometria.	105
A.33 Sistema de três lentes e meia.	106
A.34 Convertendo a estrutura do sistema de lentes para uma única peça.	106
A.35 Estrutura do sistema de lentes em peça única.	107
A.36 Convertendo o semi-círculo (cubeta) para uma única peça.	107
A.37 Cubeta em estrutura única.	108

A.38 Inserindo o vidro de sílica na estrutura do coletor. . . . .	108
A.39 Inserindo o índice de refração e coeficiente de absorção solar do vidro de sílica.	109
A.40 Inserindo água na Cubeta e definindo o índice refração e coeficiente de absor- ção solar. . . . .	110
A.41 Descontinuidade 2 da geometria do concentrador solar. . . . .	110
A.42 Paredes da cubeta (Wall 1) (a) e condições de contorno da mesma(b). . . . .	111
A.43 Parede vertical (Wall 2) abaixo da cubeta (a) e condições de contorno da mesma (b). . . . .	111
A.44 Condições de contorno da interface superior da geometria. . . . .	112
A.45 Grandezas físicas a serem computadas (a) intensidade e potencia (b). . . . .	112
A.46 Condição de contorno para reflexão nos caules das lentes. . . . .	113
A.47 Variável acumuladora (a) para interface superior do concentrador (b). . . . .	113
A.48 Inserindo a grandeza física (a) a ser contabilizada pelo acumulador (b). . . . .	114
A.49 Acumulador(a) da interface (parede) vidro-água da cubeta (b). . . . .	114
A.50 Grandeza física (a) a ser contabilizada pelo acumulador da cubeta (b). . . . .	115
A.51 Liberação dos raios de luz (a) e condições iniciais dos mesmos (b). . . . .	115
A.52 Definindo as condições iniciais do raios de luz a serem liberados. . . . .	116
A.53 Definindo o comprimento de onda. . . . .	116
A.54 Definindo os parâmetros iniciais da malha de elementos finitos. . . . .	117
A.55 Tornando a malha de elementos finitos controlável pelo usuário. . . . .	117
A.56 Definindo a malha como personalizada (a) e parâmetros da malha (b). . . . .	118
A.57 Malha de elementos finitos conforme definida pelo usuário. . . . .	118
A.58 Executa da simulação inicialmente (a) e redefine o tempo, os módulos a serem utilizados nesse estudo e executa novamente a simulação (b). . . . .	119
A.59 Trajetória dos raios de luz. . . . .	119
A.60 Apresenta os resultados guardados nas variáveis acumuladoras (a) seleção da variável do acumulador da interface superior do coletor. . . . .	120
A.61 Variável do acumulador da interface da cubeta (a) descrição das variáveis (b).	120

A.62 Definindo o tempo do resultado como final. . . . .	121
A.63 Tabela com os resultados da intensidade luminosa na lente e cubeta guardados nos acumuladores. . . . .	121
A.64 Restringindo a absorção solar á agua na cubeta. . . . .	122
A.65 Definindo a interfaces de luz incidente a ser absorvida. . . . .	122
A.66 Perfil de absorção definida pelo usuário. . . . .	123
A.67 Orientação para absorção da luz e intensidade da luz incidente conforme variável do aumulador da cubeta. . . . .	123
A.68 Temperatura de referência para o módulo de transferência de calor. . . . .	124
A.69 Definindo o fluido no módulo de transferência de calor (a) condições do fluido (b). . . . .	124
A.70 Inserindo a fonte de calor (a) e condições para liberação do calor (b). . . . .	125
A.71 Inserindo a fonte de calor (a) e condições para liberação do calor (b). . . . .	125
A.72 Definindo a variável que avalia a quantidade de energia luminosa absorvida pela água. . . . .	126
A.73 Variável da absorção solar. . . . .	126
A.74 Inserindo a variável da absorção solar na fonte de calor. . . . .	127
A.75 Inserindo o fluxo de calor (a) e condições do fluxo de calor (b). . . . .	127
A.76 Definindo o perfil do fluxo de calor. . . . .	128
A.77 Valor da temperatura em condições iniciais. . . . .	128
A.78 Definindo novo estudo (a) para estudar a absorção e transferencia de calor (b). . . . .	129
A.79 Redefinindo a unidade de tempo do novo estudo e desativando o módulo de optica geometrica. . . . .	129
A.80 Tabela de resultados da intensidade luminosa na interface da lentes e interface da cubeta. . . . .	130
A.81 Tabela de resultados da intensidade luminosa na interface da lesntes e interface da cubeta. . . . .	131

A.82 Definindo a variável que apresenta os valores de temperatura em função do tempo. . . . .	131
A.83 Gráfico de distribuição de temperatura e tabela da temperatura x tempo. . .	132
A.84 Isotermas da geometria. . . . .	132
A.85 Distribuição da intensidade luminosa absorvida. . . . .	133
A.86 Distribuição de temperatura da cubeta. . . . .	133
A.87 Isotermas da cubeta. . . . .	133

---

## LISTA DE TABELAS

2.1	AFSCFL Parâmetros estruturais usados na bancada experimental . . . . .	24
2.2	Parâmetros do CPC projetado . . . . .	35
3.1	Parâmetros utilizados na otimização do concentrador solar . . . . .	48
5.1	Concentradores solares feitos em materiais transparentes . . . . .	64
5.2	Concentradores solares em aplicação termossolar . . . . .	68
B.1	Escore obtido da avaliação de qualidade dos 83 artigos selecionados sobre concentradores solares . . . . .	134
B.2	Escores obtidos na avaliação de qualidade dos 25 artigos selecionados sobre guia de ondas . . . . .	138

---

---

# CAPÍTULO 1

---

## INTRODUÇÃO

### 1.1 O Potencial do Sol

Para o desenvolvimento social e o crescimento econômico de uma nação, a energia é o fator essencial. A qualidade de vida do homem relaciona-se com o consumo de energia que a cada ano aumenta consideravelmente em decorrência do progresso tecnológico, crescimento industrial e aumento das atividades agrícolas [1, 2].

A ampliação da oferta de energia e o desenvolvimento de sistemas mais eficientes fazem-se necessários para acompanhar esse aumento da demanda energética [3].

Os combustíveis fósseis são a principal fonte energética utilizada no mundo. O uso dessa fonte em larga escala na tentativa de suprir a demanda energética do setor produtivo está esgotando-a rapidamente, além de produzir poluição e aumento na emissão de gases do efeito estufa. A energia renovável apresenta como característica proeminente a sua disponibilidade e transformação, que não é afetada, pelo aproveitamento ou não dessa energia, enquanto no caso dos combustíveis fósseis, quanto mais se preserva, mais ele será garantido para amanhã. O desenvolvimento sustentável e a preocupação com as mudanças climáticas e ambientais contribuíram com a popularização das fontes de energia renováveis e a consequente

redução do impacto ambiental do homem na terra [3, 4].

O sol mostra-se como uma fonte de energia renovável capaz de atender a uma gama de necessidades energéticas, por exemplo, aquecimento, refrigeração, geração de eletricidade, biomassas, combustíveis entre outras [4]. A luz solar caracteriza-se por uma matéria-prima natural, inesgotável, abundante e gratuita podendo ser utilizada em diversas aplicações [3].

Constituído de plasma super aquecido e campo magnético entrelaçado, o sol possui massa de aproximadamente  $2 \cdot 10^{30}$  kg. A superfície do sol pode atingir temperatura em torno de 5762 K produzido a partir da fusão nuclear de núcleos de hidrogênio convertendo-os em hélio. A produção energética solar total é de  $3,8 \cdot 10^{20}$  MW, entretanto a parte da energia que chega à terra é igual a 63 MW. A irradiância solar, que é a quantidade de energia que o sol deposita por cada unidade de área exposta à luz solar em incidência normal a superfície iluminada é de cerca de  $1.368 \text{ kW/m}^2$ , denominado constante solar. Porém a luz solar que chega a superfície da terra é atenuada pela atmosfera, dessa forma menos energia atinge à superfície terrestre, ou seja, cerca de  $1 \text{ kW/m}^2$  quando está próximo do zênite [4].

A energia solar radiante distribui-se numa faixa de comprimentos de onda, e a energia incidente em uma unidade de área de superfície por unidade de tempo dentro de uma determinada banda espectral é denominada irradiância espectral, cujo valor é expresso em watts por nanômetro de largura de banda. A Fig. 1.1 apresenta as curvas de irradiância espectral para a luz solar em incidência direta na faixa de comprimento de 250 a 3000 nm e os comprimentos de ondas utilizados em diferentes aplicações [5].

O Brasil encontra-se numa região do globo terrestre favorável em termos de incidência solar. Além disso, conta o fenômeno anticiclone tropical do atlântico, que proporciona a baixa nebulosidade, alta irradiação e forte influência das altas pressões tropicais. Logo, mostra ótimas condições para implantação de energia solar. Vale ressaltar que a região nordeste brasileira possui alto índice de irradiação solar cujo valor máximo diário é de  $6,5 \text{ kWh/m}^2$  [6]. A região com menor irradiação solar diária ocorre na região sul do Brasil na qual a precipitação é bem distribuída ao longo do ano [7].

Nessa perspectiva, o Brasil possui grande potencial para o aproveitamento da energia solar ao longo de todo o ano. Em termos de disponibilidade, custo benéfico, acessibilidade, eficiência e capacidade a energia solar é uma ótima opção para atender a demanda energética

do país [2, 8]. Por ser uma energia passível a aplicações fotovoltaica, térmica, entre outras.

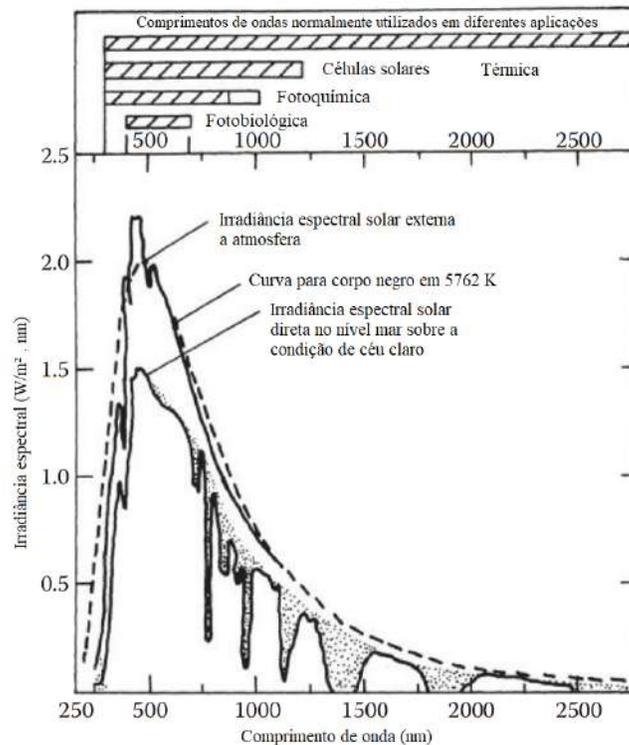


Figura 1.1: Irradiância solar. Fonte: Adaptado de [5].

A captação da radiação solar por meio de painéis fotovoltaicos, para produção de eletricidade, é considerada comercialmente, como mais promissora na área de energias renováveis. Em virtude de sua perspectiva de rápido crescimento e altos níveis de investimentos [9].

A energia fotovoltaica é vista como alternativa para lidar com os desafios de escassez de energia gerada a partir de fontes tradicionais. Com os avanços tecnológicos as placas apresentam com o passar do tempo menor custo, novos design, novos conceitos, aumento na eficiência global das células solares e os painéis solares são facilmente implementados em telhados de residências [9].

Apenas fontes energéticas biomassa, eólica, geotérmica e solar podem ser utilizadas para produzir energia térmica suficiente para produção de energia elétrica. Dentre essas três a energia solar apresenta maior potencial global por não restringir-se a alguns locais

e a biomassa não esta presente em todos os lugares na natureza. A energia luminosa é sustentável, renovável e teoricamente abundante o suficiente para atender a demanda de eletricidade do mundo . Dessa forma não é necessário considerar a ideia que ela possa eventualmente acabar pelo menos enquanto a humanidade existir. [8].

A energia solar térmica é uma tecnologia madura e possui grande potencial para atender as necessidades industriais. A necessidade de energia térmica na industria pode ser categorizada em três faixas de temperatura que são baixa, media e alta. A aplicação de baixas temperatura apresenta-se abaixo de  $150^{\circ}$ , aplicação de média temperatura ocorre entre  $150^{\circ}$  e  $400^{\circ}\text{C}$  e a faixa de alta temperatura esta acima de  $400^{\circ}\text{C}$  [4].

A industria brasileira é o setor que apresenta maior demanda energética no país . Dessa demanda energética 80% é de energia na forma de calor para aplicações de baixa, média e alta tempera [10]. O calor é necessário em vários processos industriais como limpeza, secagem, evaporação, pasteurização, esterilização, cozimento, aquecimento geral de processos entre outros. A tecnologia termo-solar para processos industriais possui amplo potencial para reduzir a demanda de combustíveis fósseis. A maior parte da necessidade de energia térmica esta na faixa de baixa e média temperatura [4, 10].

Os problemas observados nos coletores solares são perdas por reflexão no processo captação e concentração da luz, alta sensibilidade ao ângulo de incidência da luz principalmente para dispositivos com maiores valores de razão de concentração, as estruturas dos novos designs de concentradores solares não apresentam características que favoreçam sua implementação em residências. Tem-se ainda perdas térmicas por convecção, radiação, condução, além disso o alto custo inicial em relação as fontes de energia usualmente utilizadas na indústria e em residências. Entretanto, lentes têm sido empregadas para maior captação de luz e maiores valores de razão de concentração em coletores solares refletores [11–14].

A tecnologia dos guias de ondas é utilizada para confinar, por reflexão interna total, e direcionar a luz concentrada até células solares de alto-desempenho no caso de aplicações fotovoltaicas. Este é um recurso utilizado para reduzir perdas por reflexão e também garantir iluminação intensa e uniforme em células solares. Os guias de onda são feitos em material transparente de alta transmissividade [15, 16].

Um estudo realizado nos Estados Unidos apresentou um o modelo de concentrador

solar que utiliza um sistema de lentes bi-convexas e guias ondas feitas em estrutura constituída de partes distintas feita em material transparente. O modelo foi projetado com o objetivo de ser eficiente, barato, altamente concentrador e capaz de garantir iluminação uniforme em células solares de alto-desempenho. Esse sistema apresenta perdas por reflexão, perdas por acoplamento entre partes [17]. Partindo desse modelo foi levantada a hipótese de construção de um novo modelo constituído de lentes plano-convexas e guias de ondas feitos em estrutura única capaz de apresentar alta eficiência óptica, alta razão de concentração feito em material transparente, não apresentando perdas por conexões, mas perdas por reflexão mínimas e possui baixo custo.

Essa nova proposta de concentrador solar feita neste estudo apresenta características como, focalização da luz ao longo de um eixo, baixa sensibilidade ao ângulo de incidência solar, alto desempenho óptico, alta razão de concentração, em virtude da geometria é facilmente implementável em telhados residenciais. O primeiro modelo a apresentar sistemas de lentes e guias de ondas construídos em estrutura única para aplicações fototérmica, fotovoltaica, entre outras.

Por meio do presente estudo é esperado que o novo design de concentrador solar apresente melhorias no desempenho óptico e fototérmico, baixo custo, concentre a luz em uma linha ao longo de tubo receptor e funcione sem a necessidade de sistema de rastreamento em regiões equatoriais. Portanto, contribuir com o estudo na área dos concentradores solares visando a possibilidade de aplicações e funcionalidade.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

- Apresentar uma nova proposta de concentrador solar constituído por um conjunto de lentes cilíndricas e guias de ondas cujo foco ocorre ao longo de um eixo linear.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Modelar o concentrador solar através do software Comsol Multiphysics utilizando Métodos Elementos Finitos;
- Fazer a análise óptica do dispositivos em termos de eficiência óptica, razão de concentração e traçado de raios;
- Otimizar opticamente, em termos de desempenho, o dispositivo com o uso de algoritmo genético;
- Determinar a melhor geometria para receptor da luz concentrada;
- Realizar a análise térmica do modelo de concentrador solar.

### 1.3 Escopo e Organização do Trabalho

- No capítulo 2, é apresentado o estado da arte sobre concentradores solares, guias de ondas e a fundamentação teórica;
- No capítulo 3, é demonstrado os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho;
- No capítulo 4, é descrito o processo da análise térmica do dispositivo;
- No capítulo 5, apresenta-se os resultados obtido no estudo e compara-os com os resultados presentes na literatura;
- No capítulo 6, são apresentadas as conclusões e as sugestões de estudos futuros.

---

---

# CAPÍTULO 2

---

## ESTADO DA ARTE

### 2.1 Coletores Solares Aplicação Termossolar

Um estado da arte foi elaborado, por meio de uma revisão sistemática da literatura, com a intenção de encontrar trabalhos e mapear o estágio de desenvolvimento dos estudos na área de coletores solares do tipo concentrador com aplicação em geração de energia térmica. O processo de revisão ocorreu conforme apresentado e subdivido na Fig. 2.1.

O processo de seleção dos artigos foi realizado no período de fevereiro a março de 2022, nas seguintes bases de dados SCOPUS, IEEExplore (IEEE) E Web of Science. A busca foi realizada com o uso das seguintes strings: ["DASC"] OR ["reflector"OR "refractor"] OR ["direct absorption"] OR ["thermosolar"] AND ["collector"OR "concentrator"]

Somente trabalhos em inglês foram considerados. A busca por publicações foi realizada nos últimos 34 anos(1988-2022). Foram selecionados artigos na versão trabalho completo, com revisão por pares e publicados em periódicos. Na segunda etapa referente a títulos e resumos, houve avaliação conforme os critérios de exclusão e os trabalhos que apresentaram características conforme os critérios de exclusão considerados foram desconsiderados. Ainda nesta etapa foram considerados como critérios de exclusão trabalhos duplicados.

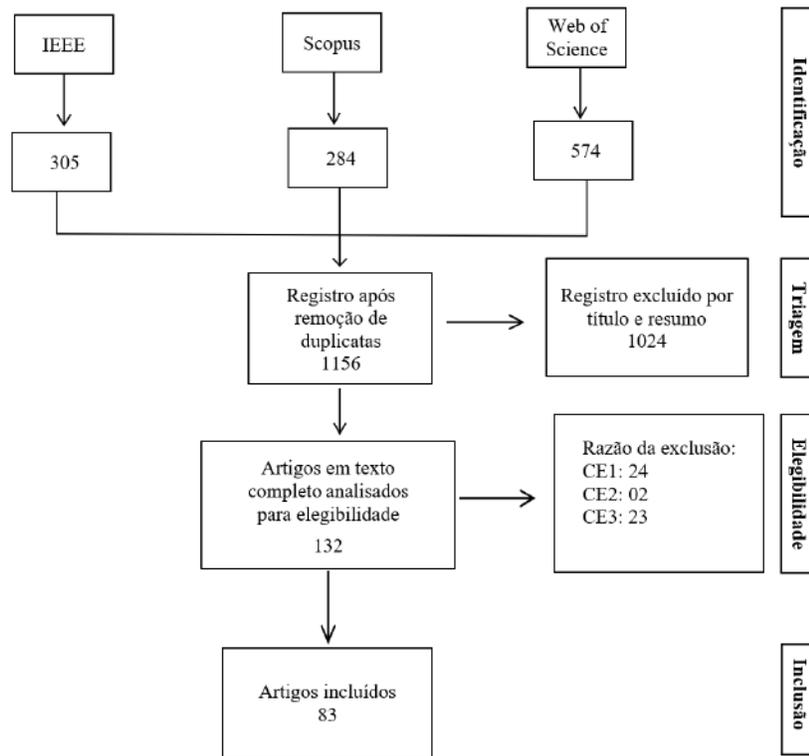


Figura 2.1: Subdivisão do processo de revisão sistemática.

Na terceira etapa, os trabalhos foram lidos e descartados, os artigos, que apresentaram as seguintes características: trabalhos que não possuem citações (CE1) trabalhos que não deixam claro o modelo de coletor solar em estudo (CE2), e trabalhos cujas versões completas estejam indisponíveis (CE3).

Os artigos incluídos passaram por um processo de avaliação de qualidade, por meio de um questionário que possui seis perguntas. Em cada pergunta são apresentadas três opções de respostas: As respostas pontuam conforme apresentado: YES (Y) = 1.0, PARTIALLY (P) = 0.5 e NO (N) = 0.0. Essa análise tem por objetivo obter uma escala de relevância dos artigos nesse processo de revisão sistemática.

A Tabela B.1, em anexo, demonstra os resultados obtidos da avaliação de qualidade dos trabalhos considerados. Foram utilizadas as seguintes perguntas no processo de revisão:

1. Os objetivos estão claros e definidos?
2. O trabalho descreve explicitamente as vantagens e as desvantagens do modelo de coletor solar estudado?

3. O trabalho apresenta a justificativa para uso de determinado modelo de coletor solar ao invés de outros?
4. O trabalho apresenta claramente a eficiência do coletor solar estudado?
5. O trabalho aponta aplicação comercial para o modelo de coletor solar estudado?
6. Os trabalhos futuros e contribuições estão claramente descritos?

Em seguida, foi construído um histograma, apresentado pela Fig. 2.2, obtido a partir dos escores finais dos trabalhos selecionados. Por meio dele, percebe-se que nenhum dos trabalhos pontuou menos que 3.0 indicando que os artigos são satisfatoriamente relevantes para o estado da arte. A média dos scores foi 3.86, isso mostra que, em média, os artigos apresentam alta relevância para o estado da arte. Além disso, 2 artigos atingiram o score (5.5), apenas 1 atingiu o score (6.0) final máximo e a maioria dos artigos alcançou o score (3.5).

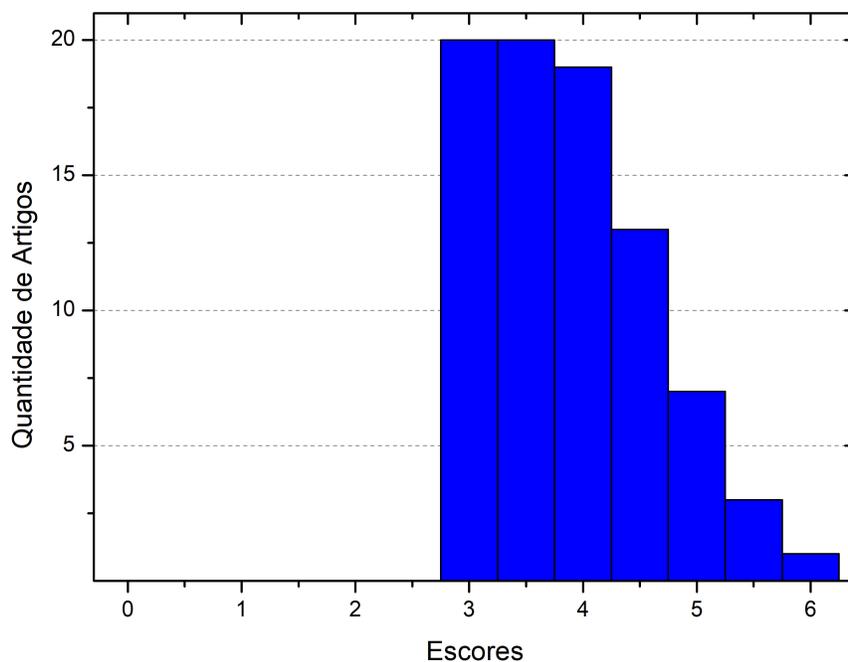


Figura 2.2: Histograma dos escores da avaliação de qualidade para os concentradores solares.

Em seguida, foram extraídos de cada artigo as informações a seguir:

- Nome do artigo

- Nome do autor
- Ano
- Instituição
- Base de pesquisa
- Modelo de coletor solar estudado
- Objetivo
- Metodologia
- Vantagens e desvantagens do modelo estudado

A partir das informações extraídas dos artigos e analisadas de forma generalizada, a Fig. 2.3 mostra a distribuição dos trabalhos por ano. Dessa forma, percebe-se que houve redução no número de trabalhos publicados em alguns períodos, já em outros, tem-se o aumento no número de trabalhos que tratam de concentradores solares com aplicação em geração de calor. No ano 2020 houve o maior número de publicações.

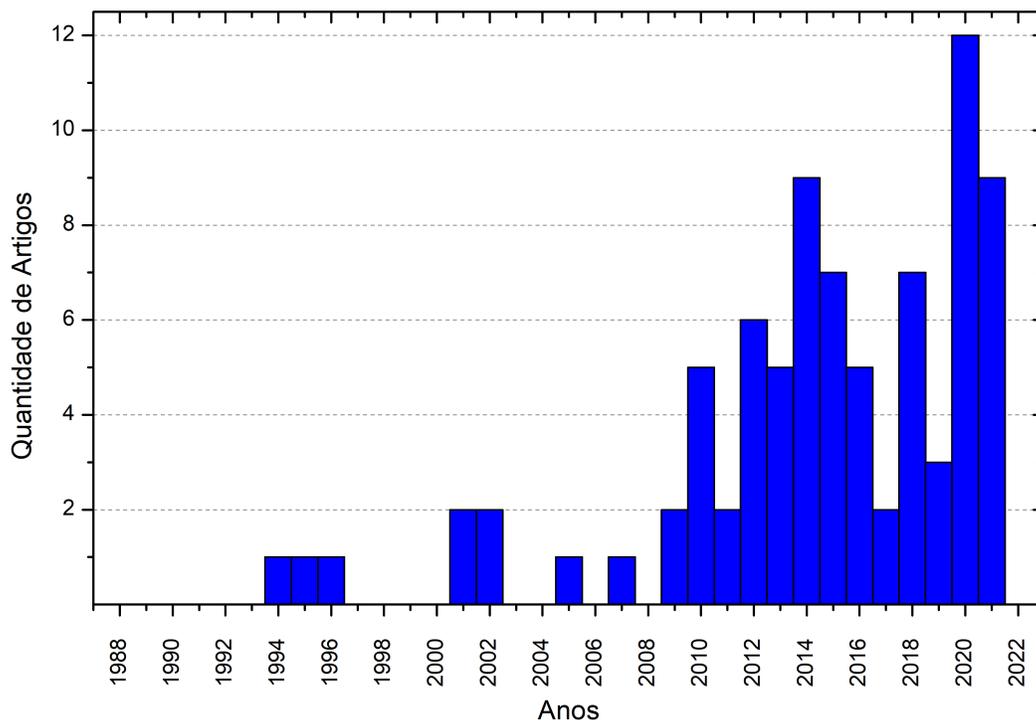


Figura 2.3: Distribuição dos trabalhos selecionados por ano.

A Fig. 2.4 mostra o percentual de trabalhos selecionados em cada base de dados. A base que apresentou menor quantidade de trabalho foi a base IEEE xplora da qual foram selecionados apenas 8 artigos, na sequência tem-se a segunda base de dados Web of Science, dela foram selecionados 12 artigos e a última base de dados da qual foram inclusos a maioria dos trabalhos foi a base Scopus com 63 artigos totalizando globalmente 83 artigos incluídos. As três bases de dados apresentaram os seguintes valores percentuais 10, 14 e 76% respectivamente dos trabalhos selecionados.

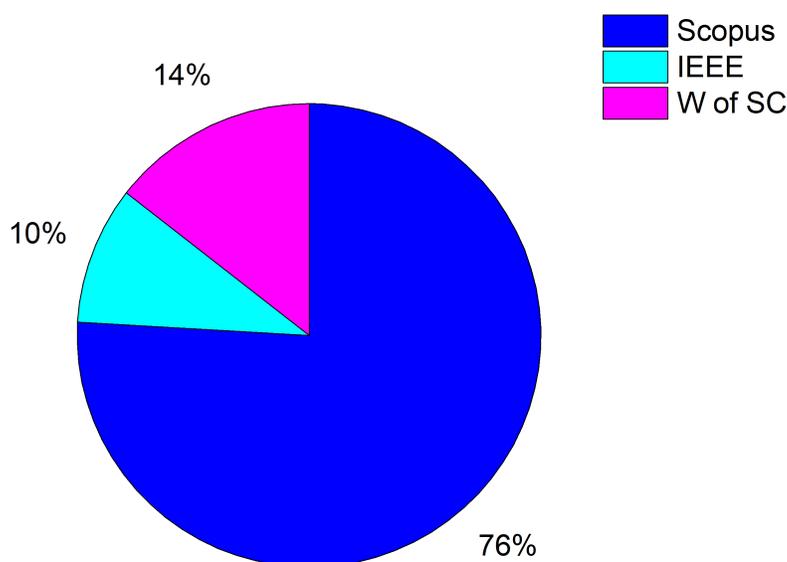


Figura 2.4: Percentual de trabalhos selecionados por base de dados.

A partir dos trabalhos incluídos, foram identificados um total de 104 modelos de coletores solares. A quantidade de modelos difere da quantidade de trabalhos, devido alguns artigos estudarem mais de um modelo de coletor. Na Fig. 2.5 são apresentados os percentuais de alguns modelos de coletores solares concentradores mais identificados neste estudo.

Os modelos de coletores apresentados apareceram em pelo menos 3 trabalhos distintos revisados e analisados. Dentre os modelos mais identificados tem-se: Concentradores Parabólicos Compostos (CPC), Refletor Fresnel Linear (LFR), Coletor de Calha Parabólica (PTC), Concentrador Solar de Espelho Fixo (FMSC), Concentrador Solar Scheffler (Schefer), Concentrador Solar Fresnel Anular (Annular Fresnel) e Concentrador de Pratos Parabólicos

(PDC) totalizando 69 modelos. Os outros 35 modelos apareceram apenas uma ou duas vezes nos trabalhos selecionados. O percentual é calculado a partir da quantidade total dos modelos identificados e inseridos no gráfico.

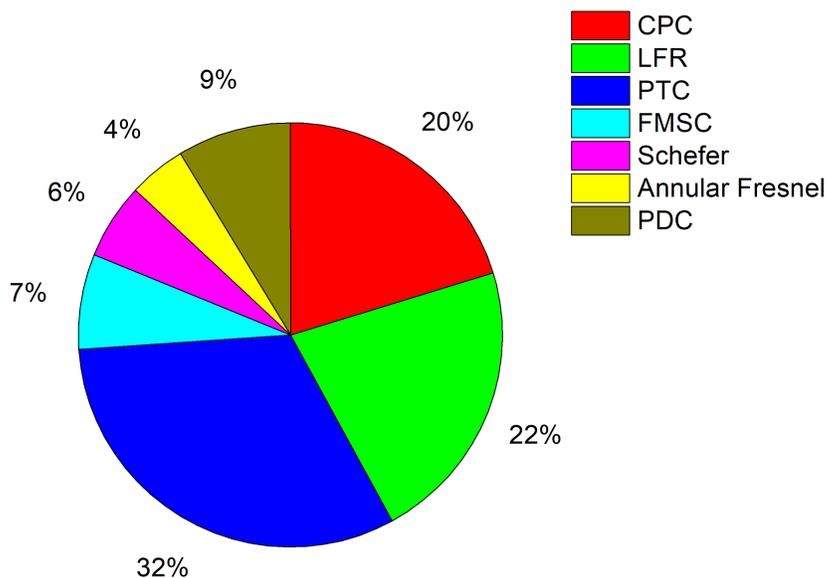


Figura 2.5: Percentual de alguns dos modelos de coletores solares.

A Fig. 2.6 mostra a distribuição dos países que têm publicado trabalhos voltados ao estudo de tecnologias de concentração solar em aplicação termossolar. Percebe-se que os países que mais têm publicações são a China e a Índia, nos últimos 34 anos. A China apresenta o maior número de publicações, ela vem seguida da Índia, o segundo país que mais tem publicações no mesmo período.

Partindo desse estado arte sobre concentradores solares e com bases na leitura dos trabalhos analisados, selecionados e lidos serão apresentados alguns conceitos e definições importantes sobre a área de concentradores solares.

A produção de energia térmica a partir da radiação solar é o objeto de estudo deste trabalho. A alta disponibilidade dessa forma de energia nos possibilita uma vasta gama de aplicações, como geração de água quente, refrigeração, produção de eletricidade, aquecimento, e diversos processos industriais [18]. Os dispositivos responsáveis pela captação e conversão da luz solar em energia térmica são os coletores solares.

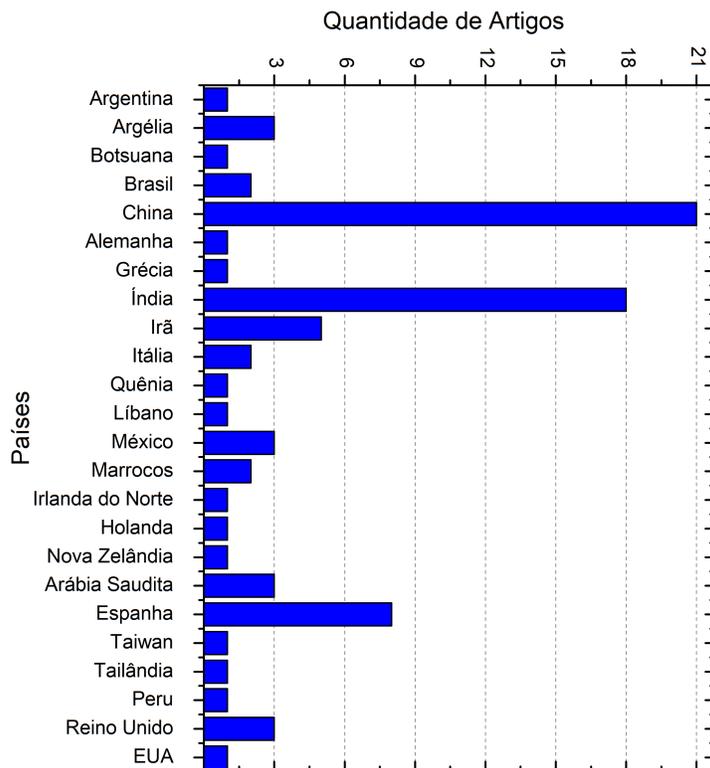


Figura 2.6: Distribuição de artigos selecionados por país.

Os coletores solares são dispositivos capazes de absorver a radiação solar, a converte em energia térmica, enquanto um fluido atravessa o coletor e absorve o calor gerado. Os coletores solares podem ser classificados em dois tipos: não-concentradores e concentradores. Os não-concentradores possuem a mesma área de captação e absorção da luz solar. Os do tipo concentradores possui uma área relativamente grande para captação da luz e uma pequena para absorção da luz solar concentrada [19].

Os coletores não concentradores são geralmente utilizados para aplicações em baixas temperaturas. Os concentradores são utilizados principalmente para concentrar a luz solar para aplicações de médias e altas temperaturas. A energia solar não concentrada é bastante conhecida, utilizada em temperatura mais baixa em uso residencial e temperaturas bem mais elevadas exigidas pela demanda industrial [20].

Os sistemas de coleta solar do tipo concentradores são classificados em duas categorias: focagem em linha e focagem em ponto. Os sistemas de focagem em linha utilizam-se de um receptor linear, pois a radiação solar é concentrada ao longo de um eixo, ao passo que

na focalização pontual a concentração ocorre em um ponto receptor com dois eixos para rastreamento solar [21], conforme apresenta a Fig. 2.7. Tem-se como exemplo de concentrador solar linear: Coletor Parabólico Concentrador (CPC), coletor para parabólico (PTC) e Refletor Linear Fresnel (LFR). Os concentradores de focalização do tipo pontual para efeito de exemplificação tem-se: Coletor de Campo heliostáticos(HFC) e coletor de Prato Parabólico (PDC) [22].

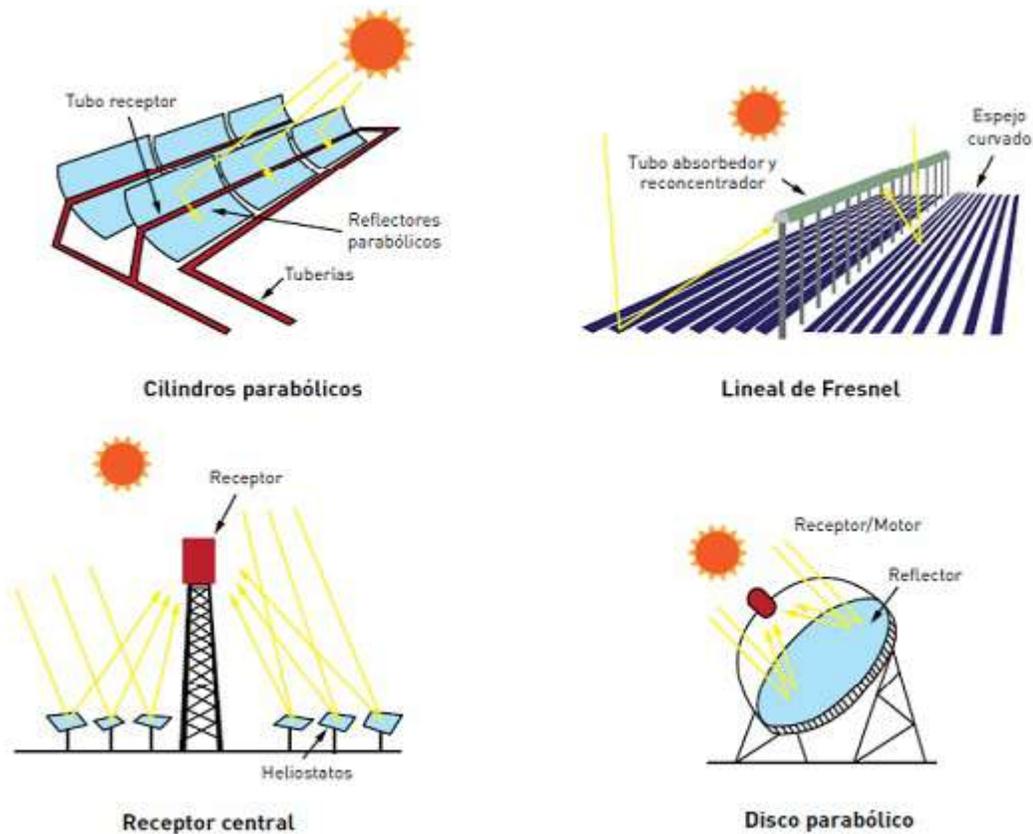


Figura 2.7: Os concentradores cilíndricos parabólicos e linear de Fresnel focalizam a luz ao longo de um eixo. Os concentradores de receptor central e disco parabólico concentram a luz em um ponto.

## 2.2 Guia de Ondas

Uma revisão sistemática foi desenvolvida com o objetivo de identificar trabalhos que tratam de guias ondas eletromagnéticas (luz solar), mapear o estágio de desenvolvimento

dessa tecnologia e suas possíveis aplicações. O processo de busca e seleção do artigo foi realizado em abril de 2022, nas bases de dados de dados SCOPUS, IEEExplore (IEEE) E Web of Science. Foi realizada a busca com as seguintes strings: “sunlight tube for lighting” e “solar waveguiding”.

O período de busca por publicações foi nos últimos 34 anos (1988-2022). Somente trabalhos em inglês na versão final, revisados por pares, publicados em periódicos foram considerados. Na sequência referente a títulos e resumos, os artigos foram avaliados, os que se enquadravam nos critérios de exclusão dessa etapa foram desconsiderados. Nessa mesma etapa, os trabalhos duplicados foram eliminados.

Na última etapa de avaliação os trabalhos foram lidos e desconsiderados, os que apresentavam as características a seguir: Trabalhos que não possuem citações (CE1), Trabalhos que não deixam claro o modelo de guia de ondas (CE2), Trabalho cujos textos completos estejam indisponíveis (CE3) e não acessíveis ao autor deste estudo (CE4). A Fig. 2.8 apresenta o processo pelo qual ocorreu a revisão sistemática.

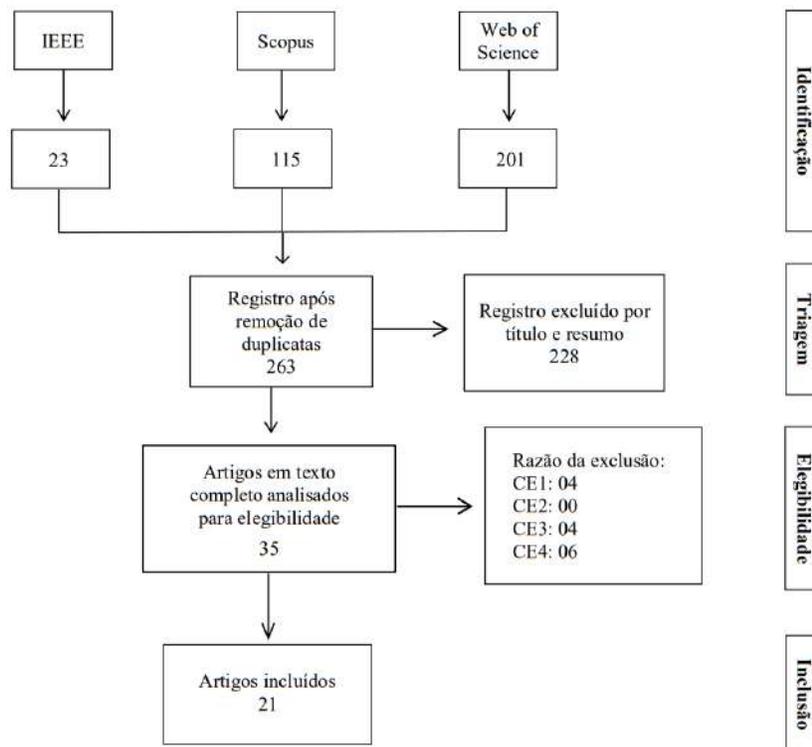


Figura 2.8: Subdivisão do processo de revisão sistemática para os guias de ondas.

Assim como para os coletores solares, os trabalhos incluídos sobre guia de ondas passaram por um processo de avaliação de qualidade através de um questionário com 6 perguntas. A intenção dessa análise é obter uma escala de relevância dos artigos para este estudo. As respostas das perguntas pontuam da seguinte maneira: YES (Y) = 1.0, PARTIALLY (P) = 0.5 e NO (N) = 0.0.

A Tabela B.2 mostra os resultados obtidos na avaliação dos artigos considerados. As perguntas utilizadas foram:

1. Os objetivos estão claros e definidos?
2. O trabalho descreve explicitamente as vantagens e as desvantagens do guia de ondas estudado?
3. O trabalho apresenta a justificativa para uso de determinado modelo de guia de ondas?
4. O trabalho apresenta claramente a eficiência do guia de ondas?
5. O trabalho aponta aplicação comercial para o modelo guia de ondas?
6. Os trabalhos futuros e contribuições estão claramente descritos?

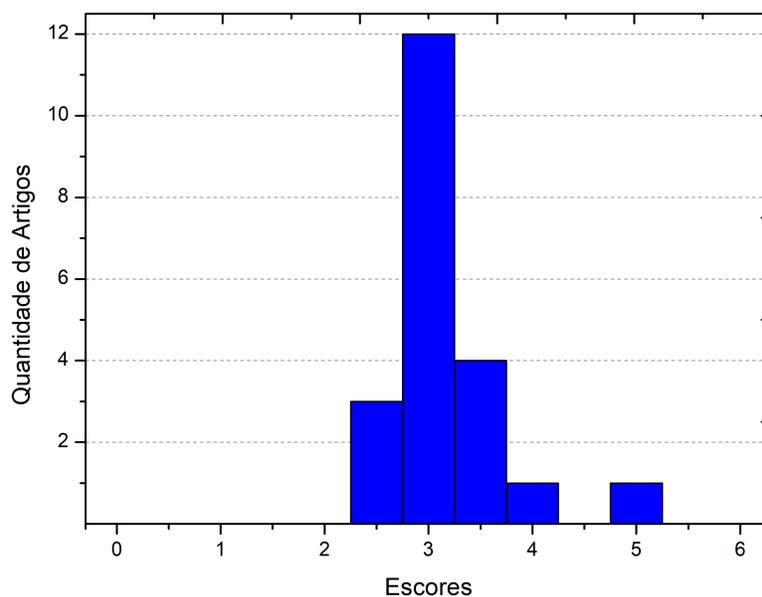


Figura 2.9: Histograma dos escores da avaliação de qualidade para os guias de ondas.

A Fig. 2.9 apresenta o histograma com os resultados do escores finais dos trabalhos selecionados sobre os guias de ondas. A partir dele percebe-se que a maioria dos trabalhos pontuaram 3.0 demonstrando a grande relevância dos trabalhos para este estudo. Nenhum artigo atingiu score máximo 6.0, a grande maioria dos trabalhos, no caso 12 artigos, alcançou escore igual a 3.0, apenas um atingiu o score 5.0, o maior score final alcançado. A média dos scores foi de 3.17 aproximadamente. As informações extraídas dos trabalhos foram analisadas de forma generalizada.

Foram extraídas de cada artigo as informações a seguir:

- Nome do artigo
- Nome do autor
- Ano
- Instituição
- Base de pesquisa
- Modelo de coletor solar estudado
- Objetivo
- Metodologia
- Vantagens e desvantagens do modelo estudado

Na Fig. 2.10 é mostrada a distribuição de trabalhos incluídos por anos, que tratam de guias de ondas. A partir dela é notório que as pesquisas sobre guias de ondas possuem publicações relativamente recentes sobre essa área de estudo, pois o maior número de trabalhos publicados ocorreu entre os anos 2010 e 2020.

A distribuição de trabalhos por país é apresentada na Fig. 2.11, logo abaixo. A partir dela percebe-se que o maior número de publicações ocorreu nos países República Eslováquia e Taiwan onde cada um desses fizeram três publicações. Na sequência, os países que em segundo apresentaram maior número de publicações a respeito de guias de ondas foram Brasil, EUA e Portugal com 2 artigos publicados por cada um.

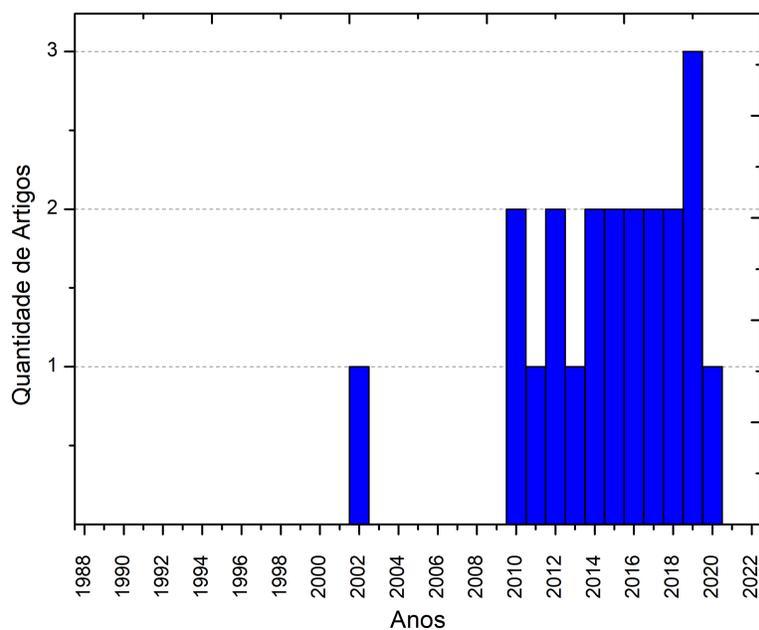


Figura 2.10: Distribuição dos trabalhos sobre guias de ondas selecionados por ano.

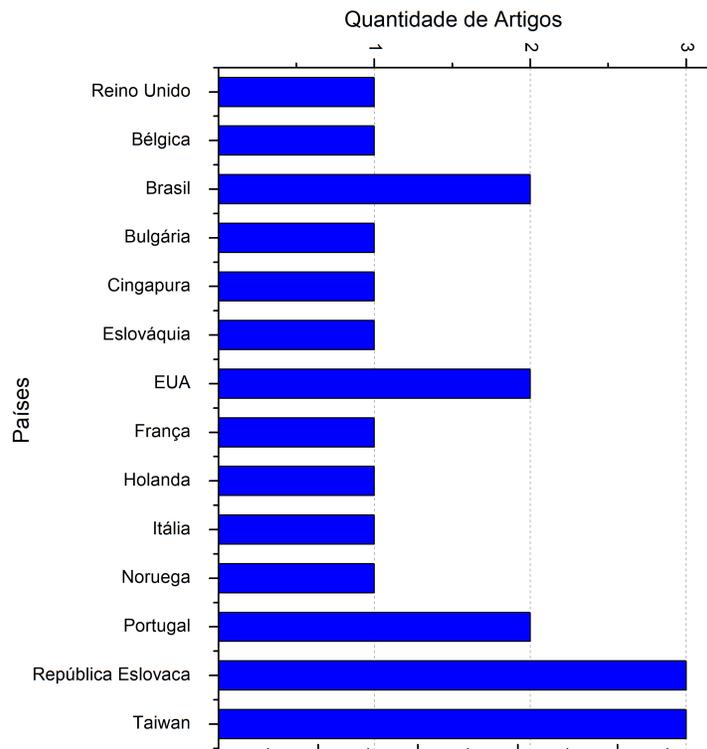


Figura 2.11: Distribuição de trabalhos por país que tratam sobre guia de ondas.

Na Fig. 2.12, tem-se a distribuição de trabalho publicados por base de dados, em que a base que apresentou o maior número de publicações foi a Web of Science, em segundo

tem-se a base de dados scopus, já a partir da base de dados IEEE xplora não houve nenhum trabalho incluso.

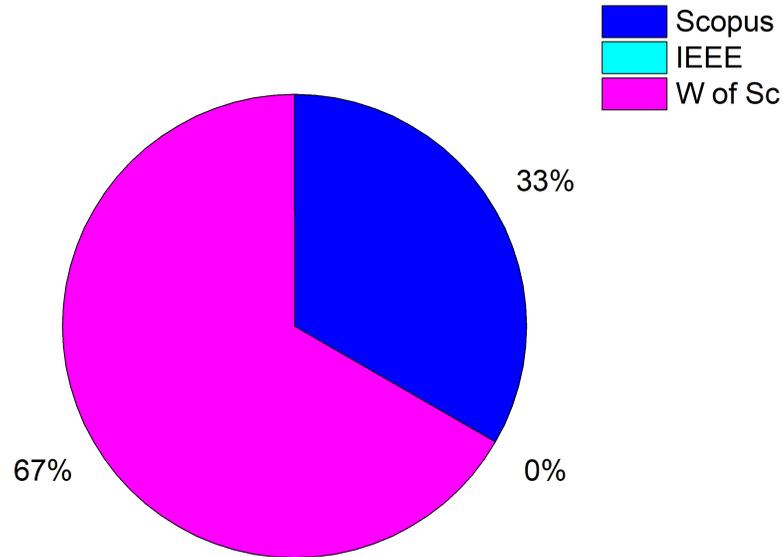


Figura 2.12: Percentual de trabalhos selecionados por base de dados.

A partir dos trabalhos selecionados neste estado da arte, alguns conceitos e definições importantes serão apresentados referentes aos guias de ondas e suas aplicações.

O desenvolvimento econômico dos países apresenta comum necessidade de recursos energéticos para suprir a demanda do setor produtivo. A luz solar mostra-se como uma opção alternativa de fonte de energia bastante promissora, em termos de seu aproveitamento de forma direta ou indireta. Por se tratar de uma fonte de energia limpa, abundante, gratuita e inesgotável, ou seja, uma fonte energética renovável com grande potencial para produção de energia em larga escala, atendendo a crescente demanda energética mundial e, por conseguinte, reduzindo o impacto ambiental [23–25].

Os guias de ondas são dispositivos capazes de captar e redirecionar a luz em incidência direta e difusa, podendo ser ocos ou maciços. Os guias de ondas ocos dispõem de uma superfície interna refletiva e são denominados tubos de luz. Eles transportam a luz solar para o interior de ambientes sem janelas nos edifícios, espaços subterrâneos, escritórios e corredores profundos [26, 27].

Os guias de ondas maciços são feitos de material transparente que apresenta alto índice de transmissividade e exploram o princípio da reflexão interna total. Esse tipo de guia de onda tem sido fortemente empregado em tecnologias fotovoltaicas. Por possibilitar uma maior captação, concentração de luz e iluminação uniforme de células solares. As células solares de alta eficiência exploram essa tecnologia que permite a redução no tamanho das células solares e, conseqüentemente, tornando-as mais econômicas [19, 25, 28].

Ambos os guias de ondas possuem uma vasta gama de possibilidades de aplicações, por exemplo, fotovoltaica, iluminação de ambientes, térmica, fotoquímica e biológica. Reduzindo assim o consumo de energia de outras fontes não renováveis que seriam utilizadas para tais aplicações. Apresentam economia para indústria e domicílios, por utilizarem de uma fonte de energia limpa, grátis e renovável [26, 27, 29].

## 2.3 Fundamentação Teórica

### 2.3.1 Modelos Propostos de Concentradores Solares

A conversão da radiação solar em calor é um fenômeno muito comum desde os tempos históricos e evoluiu para uma tecnologia de conversão solar bem desenvolvida hoje. Essa tecnologia explora o princípio básico da coleta térmica que consiste na incidência da radiação em uma superfície, a qual absorve parte dela, aumentando assim sua temperatura. A eficiência dessa superfície depende não somente da absorção da radiação, mas também de como as perdas térmica e rerradiação para o entorno são minimizadas e como a energia do coletor é removida para fins úteis [5].

Os coletores solares térmicos variam de coletores solares do tipo placa plana operando na faixa de baixa temperatura, ou seja, temperaturas abaixo de 150°C, coletores solares concentradores que operam nas faixas de média temperatura que ocorre entre 150 e 400 °C e altas temperaturas acima dos 400° C [5, 10].

Os coletores solares concentradores requerem o uso de refletores com superfícies de alta refletância especular no espectro da luz solar. As superfícies refletoras são em geral metais altamente polidos ou revestimentos metálicos em substratos adequado [5]. Os concentradores

solares podem também utilizar-se de refratores, ou seja, ao invés de espelhos usa lentes ou outros dispositivos ópticos para concentração da radiação solar. Esta tecnologia permite aumentar os fluxo de radiação nos receptores [30].

A literatura apresenta vários tipos de concentradores solares refletores, refratores, concentradores solares luminescentes (LSCs) e os refletores-refratores. Alguns trabalhos sobre concentradores solares, foram selecionados a partir do estado da arte, que fornecendo subsídios para este estudo serão apresentados de forma detalhada.

Os autores [11] apresentam um modelo de coletor solar concentrador chamado Concentrador solar Fresnel anular (AFSC) foi proposto e desenvolvido por meio de simulação. Esse modelo possui as seguintes dimensões 0,78 m de altura máxima e diâmetro de 1,72 m tendo uma razão de concentração igual a 300. O modelo possui espelhos anulares com inclinações projetadas de diferentes ângulos. Podemos ver o modelo na Fig. 2.13 Logo abaixo [11].

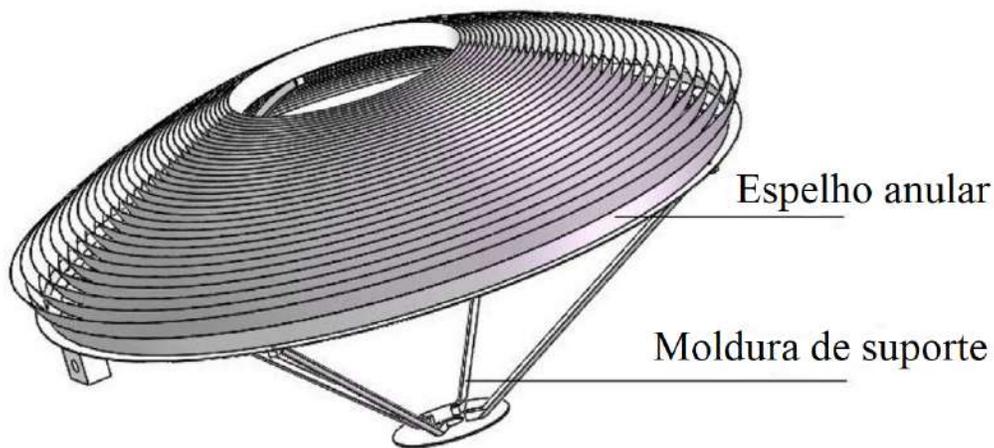


Figura 2.13: Modelo 3D de concentrador solar AFSC. Fonte: Adaptado de [11].

Os parâmetros dos refletores foram projetados detalhadamente. Conforme o método de design do LFR convencional, o percurso dos raios luminosos em 2d são apresentados na Fig. 2.14. Para esse estudo foram feitas duas suposições: os feixes de luz são paralelos e influencia de estrutura de suporte foi ignorada [11].

Conforme os autores a luz incidente sobre o coletor ocorre de forma direta, conta com sistema de rastreamento de dois eixos e 20 espelhos. Para um desvio de rastreamento

de 0,5 a eficiência é de 98,37 %.

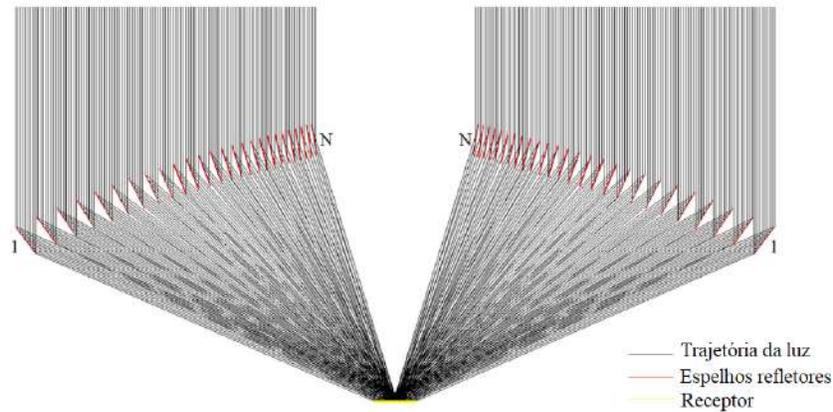


Figura 2.14: Trajetória da luz do concentrador solar. Fonte: Adaptado de [11].

O sistema tem a vantagem de ter uma abertura de campo do modelo e menores custos de operação e manutenção (pelo fato de o receptor está localizado logo abaixo do campo dos refletores). Conseqüente, o dispositivo tem grande potencial para aplicações em tecnologias de energia solar térmica, tecnologias fotovoltaica/térmica concentrada e para o processo de dessalinização da água do mar. O dispositivo sofre com perdas por sombreamento ou bloqueio entre linha de espelhos [11]. As Fig. 2.15(a) e Fig. 2.15(b) apresenta o modelo em simulação 3-D e traçado de raios, respectivamente.

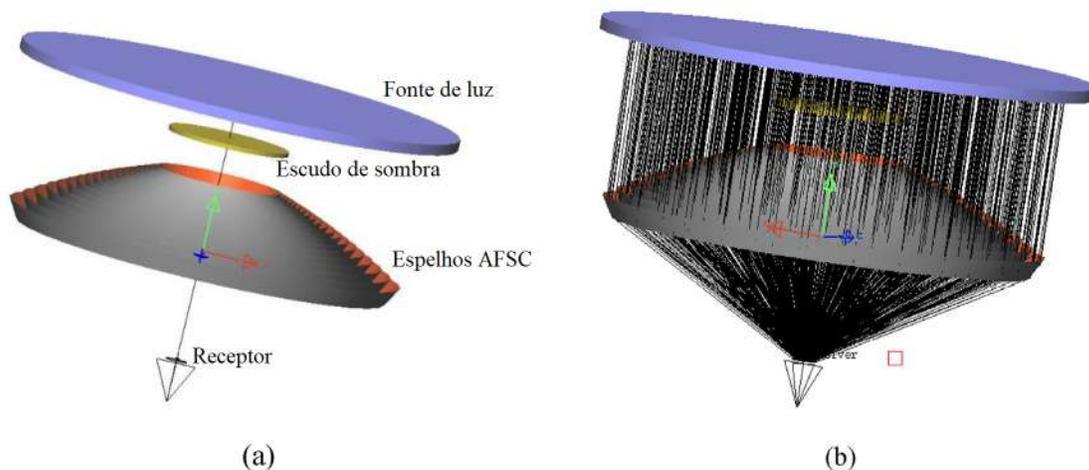


Figura 2.15: O modelo físico do AFSC com o software Lighttools (a) e traçado de raios para o modelo (b). Fonte: Adaptado de [11].

Um estudo realizados por [12] mostra um modelo de coletor solar chamado concentrador solar Anular Fresnel acoplado a uma lente circular Fresnel (AFSCFL), composto por espelhos anulares e implementado por uma lente de mesmo formato é proposto. O estudo foi realizado por meio de simulação computacional e de forma experimental. A proposta do AFSCFL tem como objetivo alcançar alta taxa de concentração, baixa altura e baixo custo de instalação, veja a Fig. 2.16 logo abaixo [12].

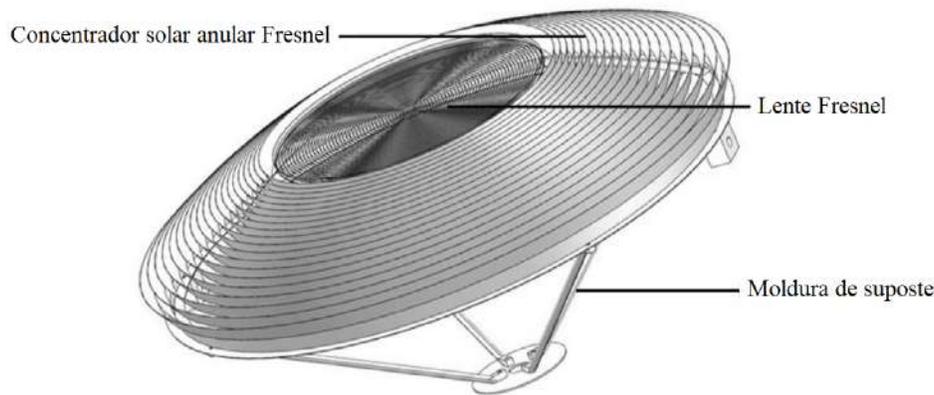


Figura 2.16: Diagrama esquemático do AFSCFL. Fonte: Adaptado de [12].

O AFSC tem foco do tipo pontual, alta taxa de concentração e a localização do receptor ficar logo abaixo dos refletores. Apresenta baixo custo por conta da forma refletiva e tarefa Fresnel em comparação com o coletor solar do tipo prato. Possui perda de bloco que pode ser reduzida com as diferentes alturas de cada espelho. O AFSCFL é composto por um concentrador solar anular Fresnel (AFSC), uma lente circular Fresnel, estrutura de suporte e um receptor. O dispositivo conta com sistema de rastreamento de raios solares de dois eixos [12].

Percurso dos raios luminosos pelo sistema composto pelos espelhos e lente são apresentados na Fig. 2.17. A refletividade dos espelhos foi de 0,85 e a transmissividade da lente 0.92. O estudo do desempenho óptico, a altura e o diâmetro do primeiro espelho são estáveis. Durante o estudo o número de espelho variou de 14 a 26 camadas [12].

O sistema apresenta desvantagem devido perdas de eficiência, principalmente, por erros de rastreamento. Um número muito grande de espelhos reduz a precisão do rastreamento. Além disso quando os raios de luz incidem de forma inclinada no coletor solar

apresenta perdas por sombreamento e bloqueio [12].

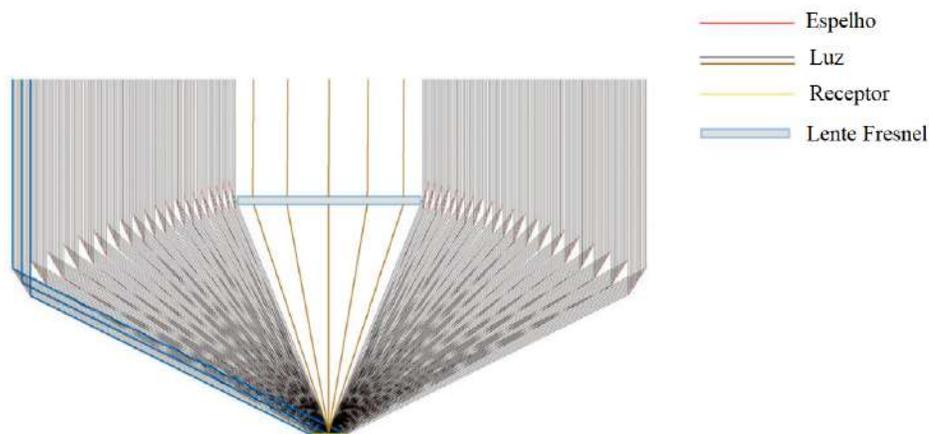


Figura 2.17: (a) Diagrama esquemático da trajetória da luz do AFSC e (b) trajetória da luz na lente Fresnel. Fonte: Adaptado de [12].

A Tabela 2.1 apresenta as dimensões estruturais do dispositivo para o estudo experimental. Ele foi realizado em um dia de verão entre as 10 e 17 horas em latitude e longitude iguais a 116,39 E e 39,92 N, respectivamente [12].

Tabela 2.1: AFSCFL Parâmetros estruturais usados na bancada experimental

Dispositivo	Parâmetro	Valor
Espelhos Fresnel Anulares	$D_1$	1,732 m
	$H_1$	0,5 m
	$\delta_1$	60°
	L	0,1 m
Lente Circular Fresnel	Número de espelhos	20
	Distância focal	0,7340 m
	Diâmetro	0,5926 m
	Largura de cada lente	0,5 mm
AFSCFL	Razão de concentração	301,65

O AFSCFL apresenta eficiência óptica igual a 85,62% e razão de concentração igual

a 301,65. A Fig. 2.18 apresenta a estrutura para o teste experimental do modelo de concentrador solar. O emprego da lente no dispositivo aumenta a eficiência térmica do coletor em torno de mais de mais de 50%. A eficiência térmica máxima alcançada com dispositivo foi de 88,04 % [12].



Figura 2.18: As fotos do AFSCFL em condição experimental. Adaptado de [12].

A Fig. 2.19 apresenta o modelo de receptor utilizado na experimentação. O receptor é feito de tubo de cobre de alta condutividade térmica. A distribuição da radiação sobre ele é circular, por conta disso tem-se sua projeção como bobina espiral. A superfície de incidência solar foi revestida por uma tinta de alta absorção, cuja absorção é superior a 92% [12].

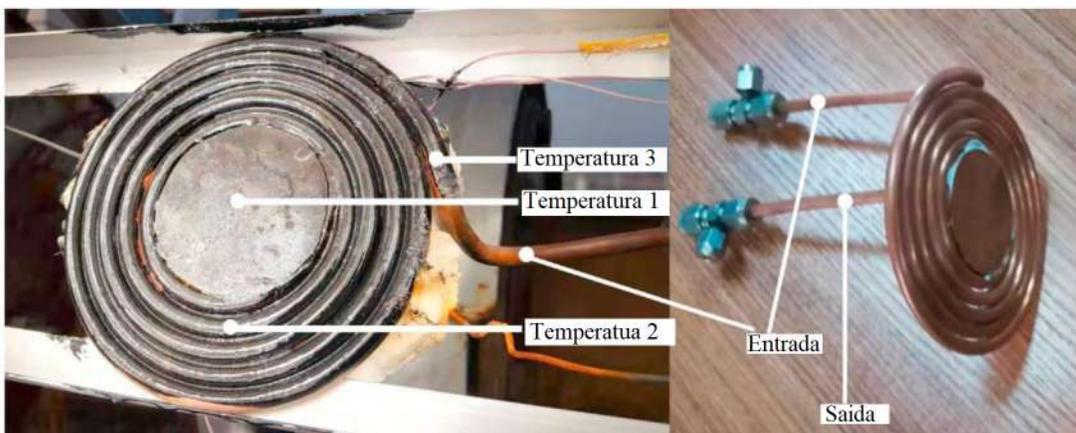


Figura 2.19: Receptor do AFSCFL. Fonte: Adaptado de [12].

Na literatura tem-se um modelo de concentrador refletor solar linear Fresnel

(LFRSC) em uma cavidade absorvedora estacionário suspensa acima do plano do concentrador para produção de água quente. O sistema LFRSC é um sistema de concentração solar composto por faixas de espelhos planos no nível do solo que giram em torno de eixos paralelos independentes que refletem a luz solar para um absorvedor linear elevado e fixo. Ele também conta com um sistema de rastreamento de eixo único [13]. A estrutura é apresentada na Fig. 2.20, logo abaixo.

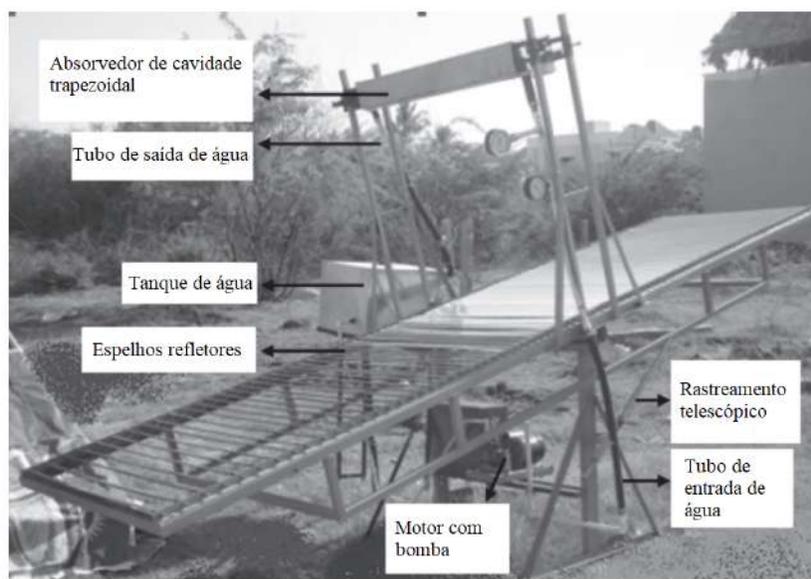


Figura 2.20: Configuração experimental do LFRSC com absorvedor de cavidade trapezoidal. Fonte: Adaptado de [13].

O trabalho aborda o sistema LFRSC como alternativa ao sistema de concentração solar de torre com campos heliostático. O custo de fabricação e manutenção do LFRSC é consideravelmente menor. O estudo feito por meio de simulação e também de forma experimental. Uma grande vantagem do sistema LFRSC é que conta com espelhos planos que são bem mais baratos em comparação com refletores de vidro parabólico. Esse, por sua vez, é montado próximo ao solo reduzindo custos e quesitos estruturais.

O receptor é uma cavidade linear estacionária, trapezoidal, composta de múltiplos tubos. A região interior da cavidade, externamente aos tubos, possui ar como mostra a Fig. 2.21. São os tubos que absorvem a radiação solar refletida pelo LFRSC posicionado no solo aquecendo, assim, a água que flui em seu interior e absorve o calor [13].

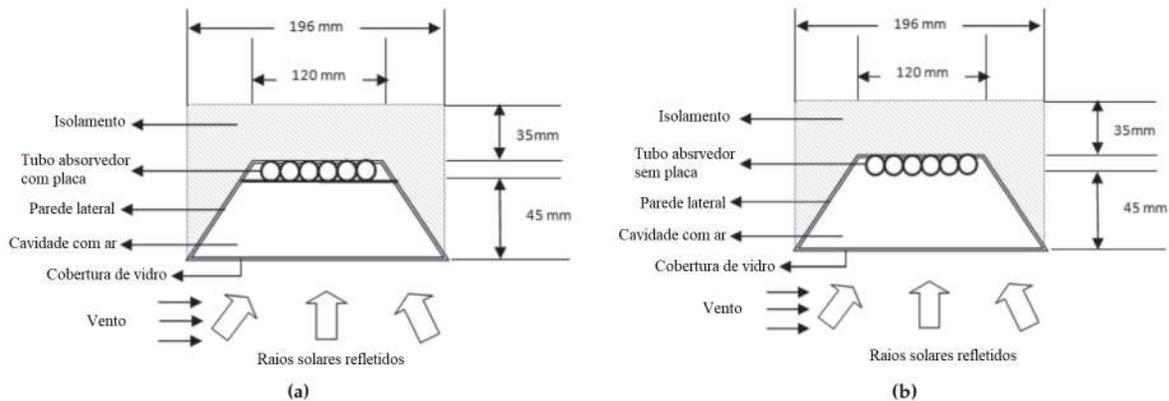


Figura 2.21: Esboço de absorvedores de cavidade trapezoidal para modelagem analítica com placa (a) e sem placa (b). Fonte: Adaptado de [13].

As perdas de calor dos tubos absorvedores decorrem de mecanismos complexos incluindo os processos de trocas de calor por radiação, convecção e condução. Isso acaba por afetar a eficiência do coletor. As perdas de energia térmica dependem de fatores como geométricos da cavidade, tubos (com e sem placa embaixo do absorvedor), distância entre tubos adjacentes, materiais entre outros [13].

O estudo experimental foi desenvolvido para avaliar o efeito da temperatura na superfície do absorvedor, da cavidade do absorvedor (com e sem placa abaixo dos tubos absorvedores) a vazão mássica do fluido de trabalho, no caso água, em sua temperatura de operação. Um modelo de cavidade absorvedora possui placa absorvedora na parte superior da cavidade. O outro modelo de cavidade é desenvolvido com tubos absorvedores sem placa na parte superior da cavidade [13].

Os elementos que compõem o LFRSC convencional são: os tubos absorvedores com ou sem placa abaixo, tampa de vidro transparente colocada embaixo da cavidade do absorvedor, os refletores e a estrutura de suporte. A Fig. 2.22 Apresenta o percurso do raios luminosos incidentes sobre o sistema [13].

Os sistemas dispõem de 80 espelhos, tanque de água, cavidade absorvedora configurada com termopares, regulador de vazão e bomba de circulação de água constituindo todos os aparatos para experimentação. Cada espelho tem dimensões iguais 1000 mm de compri-

mento e 40 mm de largura, estes são fixados em estrutura de suporte em formato retangular de 1050 mm de comprimento e 4100 mm de largura e possuem uma refletividade de 0,98. Os refletores foram fixados separadamente em ângulo necessário, a condição de incidência solar de meio-dia, com a intenção de focar os raios solares no absorvedor. A dimensão do tanque de armazenamento de água são de 350 x 350 x 475 mm com isolamento de lã de vidro de espessura igual a 150 mm em todos os seus lados. Uma válvula reguladora de fluxo é instalada para controle do fluxo de água por meio dos tubos absorvedores [13].

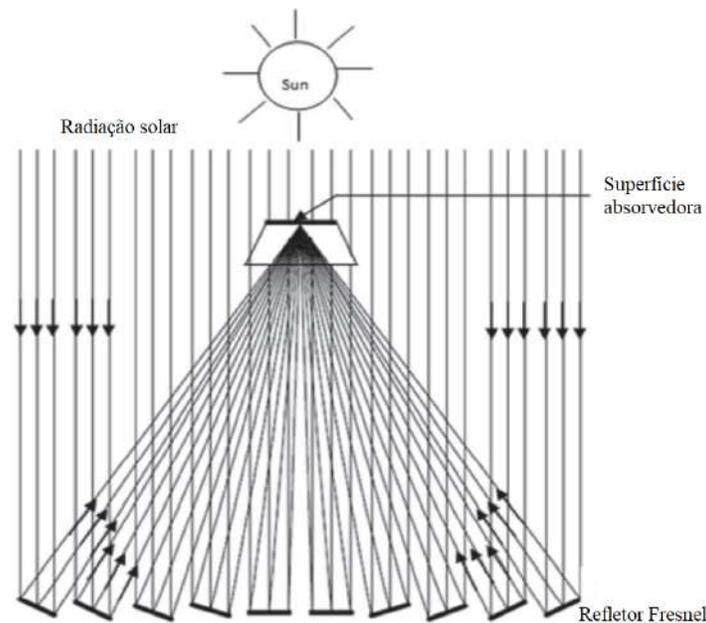


Figura 2.22: Uma vista esquemática do LFRSC com absorvedor de cavidade trapezoidal. Fonte: Adaptado de [13].

A cavidade absorvedora dispõe de seis tubos redondos absorvedores de cobre, cujo diâmetro externo é 15,8 mm e diâmetro interno de 12,7 mm e comprimento de 1000 mm soldados juntos em uma única camada de 96 mm de largura posicionado sobre a placa absorvedora de cobre de 120 mm de largura, isso para o primeiro modelo de cavidade. No segundo são colocados os tubos com as dimensões iguais a do primeiro sem a placa. Na superfície do absorvedor tem um revestimento de superfície seletivo de cromo preto depositado por meio do processo de eletrolvanização. O revestimento de cromo tem espessura de cerca de 12  $\mu\text{m}$ . Com a intenção de amenizar as perdas de calor da superfície absorvedora uma cobertura de vidro de 196 mm de largura é fixada no fundo da cavidade 45 mm abaixo da superfície

do absorvedor. Um revestimento de isolamento de espessura igual a 35 mm é colocado nas laterais e na parte superior da cavidade [13].

A eficiência térmica máxima alcançada para o absorvedor com placa foi de 32% e para absorvedor sem placa foi de 26%. A razão de concentração obtida foi de 22.44 para os 80 refletores [13].

Uma nova proposta de concentrador solar é feita, por [31], contando com sistema de rastreamento solar Linear-a-ponto (LSTC). O modelo consiste de um espelho de coletor de calha parabólica PTC e uma lente de Fresnel FL de duas seções, ambas montadas em rastreador solar de 2 eixos. O objeto principal do modelo de concentrador é propor uma configuração simplificada para um concentrador de rastreamento solar por meio de simulação em software de rastreamento de raios. As dimensões do PTC são comprimento 1,0 m, largura de 1,0 m, distância focal igual 1 m. A lente LF possui as seguintes dimensões comprimento de 1 m, largura de 0.01 m, distância focal de 1.005 m como mostra a Fig. 2.23, [31].

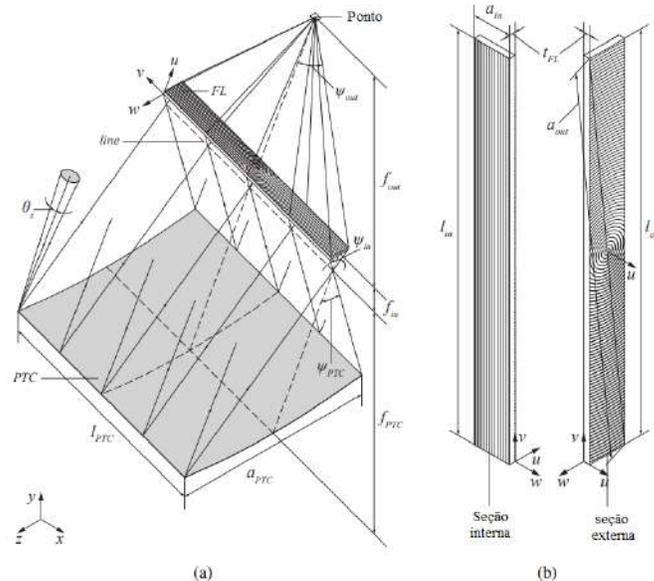


Figura 2.23: (a) Concentrador de rastreamento solar linha-a-ponto e (b) seção interna/externa da lente. Fonte: Adaptado de [31].

O PTC concentra a luz em uma eixo linear cuja razão de é de 10x, a lente, cuja transmitância é 0,855, aumenta a concentração de 10 para 100x transformando o eixo focal em um ponto focal [31].

O concentrado solar LTC é concentrador solar que funciona utilizando da reflexão e refração do feixe de luz concentrando o fluxo de energia solar em uma pequena área [31].

A concentração solar é feita em duas etapas. Na primeira etapa o PTC de dois eixos reflete os raios de luz incidente do sol. Como os refletores tem a forma parabólica, os raios de luz que atinge sua superfície serão refletidos ao longo de uma linha. A segunda etapa ocorre quando a lente Fresnel transforma a concentração linear em um ponto por refração veja na Fig. 2.24 [31].

A principal vantagem da LF empregado no concentrador é que ela é fabricada de polimetilmetacrilato material relativamente barato, entretanto o custo de fabricação aumenta juntamente com o tamanho da lente e em larga escala deve ser fabricado em seções menores com tamanho de prisma pequeno, o suficiente para concentrar a radiação solar corretamente [31].

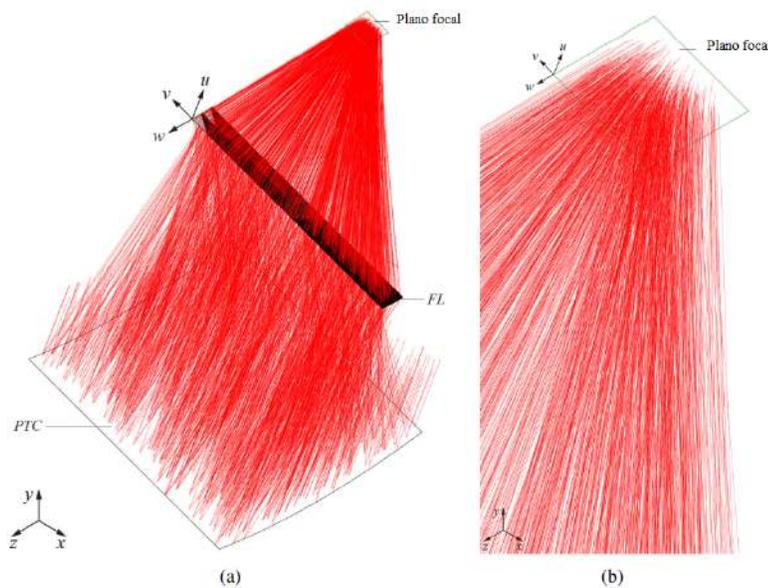


Figura 2.24: (a) Simulação de traçado de raios linha-a-ponto onde os raios do sol que chegam são colocados perto o PTC para fins ilustrativos. (b) Plano focal aproximado. Fonte: Adaptado de [31].

A concentração solar foi possível alterando a direção de varredura da seção transversal interna e externa da LF de extrudada para revolvida respectivamente. O passo do

prisma é de 0.001 m para seção interna foi com esse valor encontrado que foi possível refrata a luz no padrão desejado dentro da espessura da lente. Este processo foi utilizado pela seção externa para desviar a luz o mais próximo possível do centro do ponto focal da LF [31].

A LF de duas seções foi utilizada para elevar a razão de concentração transformando a linha em um ponto focal. Como a lente está próxima ao foco linear, é necessária uma lente de escala reduzida [31].

Em um estudo realizado por [14] é apresentado um novo tipo concentrador solar denominado concentrador solar de lentes Fresnel de foco fixo (FFFSC), que combina lente Fresnel com um sistema de rastreamento de eixo polar. O dispositivo apresenta vantagens, como menor custo de fabricação em relação a sistemas de rastreamento de elevação azimute e também baixo custo de energia, logo é capaz de concentrar a luz em uma pequena área fixa. O desempenho óptico do modelo foi testado experimentalmente e simulado numericamente, levando em consideração os efeitos de tempos solares, erros de rastreamento de ajuste periódico. O concentrador de lente de Fresnel de foco fixo usando o rastreamento de eixo polar é apresentado na Fig. 2.25. A lente é feita de PMMA, possui diâmetro de 1100 mm, espessura de 3 mm, passo de ranhura de 1 mm e distância focal de 1000 mm [14].

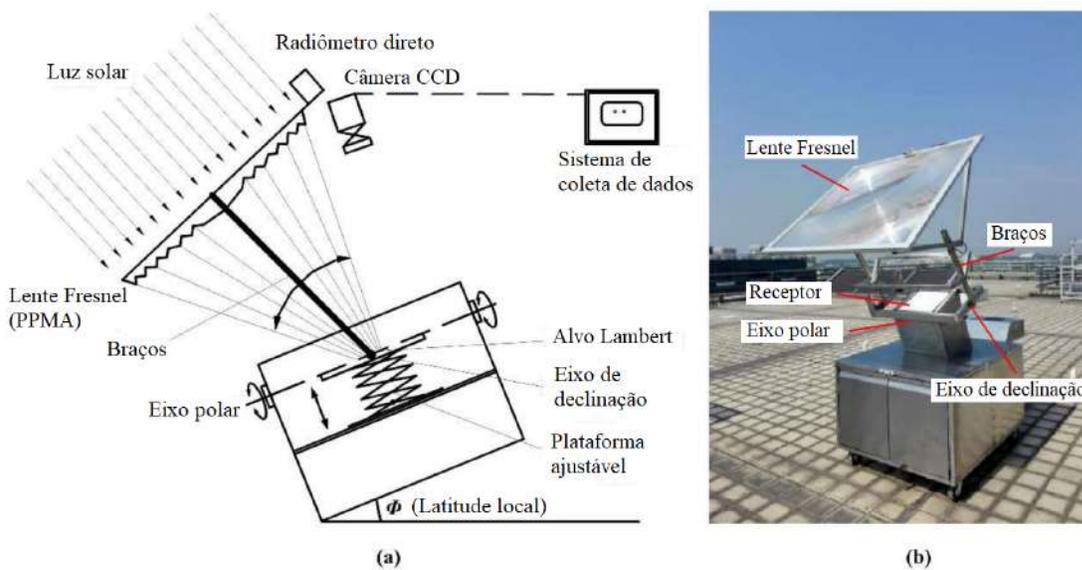


Figura 2.25: Diagrama esquemático da plataforma de experimentos; e (b) uma foto do Fresnel de foco fixo concentrador solar de lente usando rastreamento de eixo polar. Fonte: Adaptado de [14].

Os resultados obtidos pelos autores [14], mostraram que o dispositivo obteve uma eficiência óptica em torno de 71,61% e razão de concentração de valor médio e máximo de aproximadamente 86,64 e 1319,43 respectivamente na análise experimental. A simulação numérica apresentou um desempenho óptico em torno de 74,70% e razão de concentração cujo valor médio e máximo são de respectivamente 90,40 e 1356,70. Mostrando que o FFFSC possui alta eficiência óptica e pode obter alta temperatura em aplicação prática [14].

Os concentradores solares exploram o conceito de razão de concentração (CR) . A razão de concentração solar é obtida refletindo-se ou refratando o fluxo de radiação solar, a partir de uma área de abertura (interceptação)  $A_a$  e então é refletida ou refratada para outra área receptora/absorvedora menor  $A_r$ . A razão de concentração óptica é obtida a partir da razão entre intensidade da radiação  $I_r$  no receptor pela intensidade da radiação  $I_a$  na abertura [5], [30]:

$$CR_o = \frac{I_r}{I_a} \quad (2.1)$$

Enquanto que a razão de concentração geométrica é baseada nas áreas, ou seja, a razão área  $A_r$  do receptor pela  $A_a$  da abertura [5]:

$$CR = \frac{A_r}{A_a} \quad (2.2)$$

Concentradores solares são inerentemente mais eficientes a uma dada temperatura em relação aos coletores planos, devido a área de perda de calor ser menor do que a área de abertura. Enquanto que coletores de placas planas, as áreas de abertura e receptora são iguais. Por meio de um simples balanço de energia é possível ilustrar este princípio. A energia útil  $q_u$  fornecida por um coletor é expressa por [5], [30]:

$$q_u = \eta_o I_c A_a - U_c (T_r - T_a) A_r \quad (2.3)$$

Onde  $\eta_o$  é a eficiência óptica,  $I_c$  a intensidade da radiação incidente,  $T_r$  a temperatura do receptor,  $T_a$  a temperatura ambiente e  $U_c$  o coeficiente de perda. A eficiência

térmica instantânea do coletor sob condição de estado estacionário medindo fluxo de massa  $m$  e taxa do fluido de transferência de calor é expressa como [5]:

$$\eta_c = \frac{mC_p(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})}{A_a I_c} \quad (2.4)$$

A eficiência térmica ainda pode ser descrita através da seguinte expressão:

$$\eta_c = \frac{q_n}{I_c A_a} \quad (2.5)$$

A partir das equações (2.3) e (2.5) obtém-se a expressão para a eficiência instantânea de um concentrador solar dada por:

$$\eta_c = \eta_o - \frac{U_c(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})}{I_c} \frac{1}{CR} \quad (2.6)$$

### 2.3.2 Guia de Ondas Maciço

O conceito de canalizar a luz dentro de um dielétrico longo e estreito, por reflexão interna total, existe há muito tempo. John tyndall (1870) mostrou que a luz pode ser contida e guiada pelo interior de uma fina corrente de água. Posteriormente, utilizou-se "tubo de luz" de vidro e na sequência fios de quartzo fundido para demonstrar e melhorar o efeito de contenção e guiamento da luz em meios transparentes [32].

Em 1900, foi patenteado um aparato para guiar a luz através de uma haste de vidro dobrada para iluminar o interior da boca para um dentista, mas ele estava longe de ser perfeito. Os primeiros dispositivos de guia de luz foram desenvolvidos para guiar a luz para iluminação ou displays e foram utilizados pela primeira vez para observar o interior do corpo humano. Dispositivos esses que acabaram inclusive evoluindo para a fibra óptica [33].

A reflexão interna total é o fenômeno responsável pelo confinamento da luz dentro do vidro ou outros materiais transparentes. Ele envolve o envio da luz por meio do material, desse modo atinge a superfície exposta ao ar em um ângulo denominado ângulo crítico

e,então,a luz é refletida de volta no sólido. A reflexão interna total ocorre quando a luz viajando em um meio tenta entrar em outro meio de índice de refração menor [33].

Os elementos chaves da fibra óptica, do ponto de vista da óptica são o núcleo e revestimento da fibra. O núcleo é a parte interna da fibra, responsável por guiar a luz. A casca envolve completamente o núcleo da fibra. O núcleo da fibra possui índice de refração maior que o da casca, então a luz viajando no núcleo quando atinge a interface núcleo-casca em um ângulo de crítico é confinada no núcleo por reflexão interna total [33]. Essas ideias são exploradas por pesquisadores no estudo de guias de ondas para uma variedade de aplicações como, iluminação de ambiente com luz natural, aplicação fotovoltaica e fotoquímica. A partir de um estado arte sobre guias de ondas foram selecionados alguns trabalhos, presentes na literatura, para fundamentação do presente estudo.

Em um estudo os autores [15] propõem um sistema de iluminação solar por meio do guia de luz, complementado com uma fonte de luz auxiliar, composto por diodos emissores de luz nas cores vermelho, azul, verde e branco LEDs RGBW contando com um módulo de mistura de luz. A fonte de luz auxiliar tem como finalidade compensar as variações temporais na iluminância solar [15].

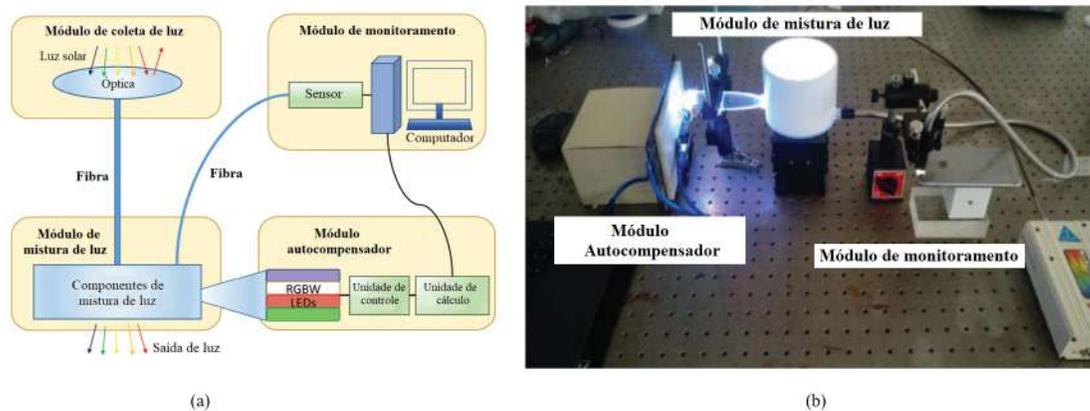


Figura 2.26: (a) Estrutura do sistema de iluminação solar proposto e (b) Configuração experimental. Adaptado de [15].

O dispositivo proposto consiste em quatro módulos: módulo de coleta de luz, auto-compensação, monitoramento, e mistura de luz, veja na Fig. 2.26. Esse consiste apenas em um concentrador parabólico composto (CPC) e um tubo de mistura de luz, resultando em

um sistema econômico [15]. Ele foi desenvolvido para aplicação em iluminação de ambientes com luz natural.

Cada módulo do dispositivo tem sua função, o módulo de luz é responsável por coletar utilizando componentes ópticos para coleta e direcionamento da luz, o módulo de monitoramento usa sensor para analisar a distribuição espectral da luz solar, o módulo de compensação automático calcula o espectro necessário para compensar a luz recebida acionando os LEDs RGBW adequadamente e o módulo de mistura é responsável por misturar a luz solar recebida e dos LEDs auxiliares produzindo iluminação constante e de alta eficiência. A Tabela 2.2 apresenta os parâmetros de design do dispositivo [15].

Em comparação com outros sistemas convencionais de iluminação solar com compensação de LED, o modelo apresentado é constituído simplesmente de um concentrador parabólico composto e tubo de mistura de luz. Estes componentes foram projetados em plásticos ópticos por meio do processo de moldagem por injeção tornando o módulo econômico [15].

Tabela 2.2: Parâmetros do CPC projetado

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>
Diâmetro de entrada	25 mm
Diâmetro de saída	6 mm
Ângulo de incidência máximo permitido	7,58 graus
Ângulo de acoplamento máximo permitido	33,36 graus
Comprimento total do CPC	116,42 mm
Material	PMMA

Os resultados da simulação apresentaram a uniformidade e eficiência óptica do tubo em torno de 82,9% e 85,7% respectivamente. A partir dos resultados experimentais esses valores foram de 85,9% e 83,3%, respectivamente [15].

Na literatura, um estudo apresentada uma abordagem simples para aumentar o comprimento de concentrador solar luminescente LSCs de guias de ondas de fibra óptica (FWLSC), utilizando uma instalação semi-industrial projetada para desenhar fibra óptica.

Essa é uma metodologia que permite a produção de fibras de óptica de plástico de núcleo oco (POF) com até 2,5 m de comprimento apresentado na Fig. 2.27 [34].

Essa nova abordagem para fabricação de FWLSCs de fibra longa com geometrias distintas, obtém-se LSCs de grande área baseada em POFs revestido a granel de núcleo oco com altos fatores de concentração em torno de 12,3 e eficiência óptica de 72,4%, com as vantagens de ser mais flexível, mais leve e econômico, ver na Fig.2.28. Os FWLSCs de núcleo oco mostraram maior eficiência de aprisionamento e melhor estabilidade a intempéries [34].

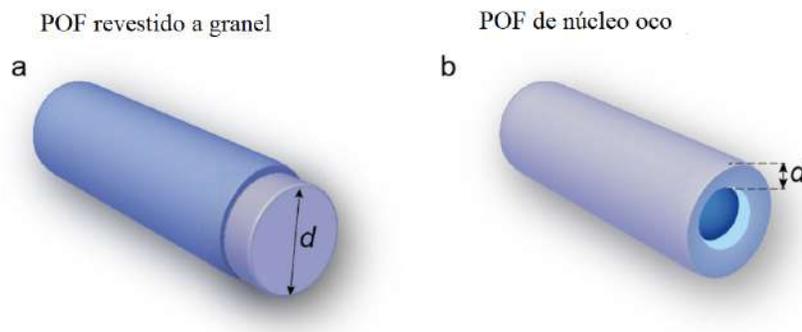


Figura 2.27: Representação esquemática de um LSC feito de (a) revestido a granel e (b) POFs de núcleo oco com valores de espessura de PMMA de  $d \approx 10^{-3}$  m e  $d \approx 10^{-4}$  m, respectivamente. Fonte: Adaptado de [34].

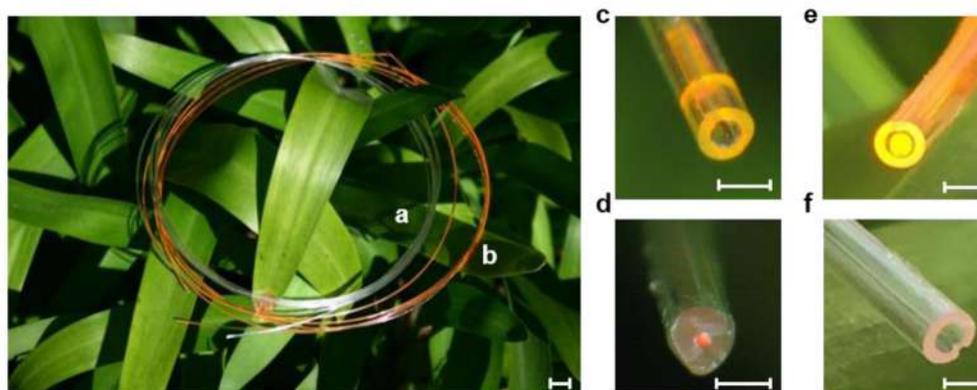


Figura 2.28: Fotografias ao ar livre das barras de escala de núcleo oco (a) U6Eu-FWLSCs e (b) U6Rh6G-FWLSCs de  $10^2$  m. Ampliação de a extremidade FWLSC de (c, e) U5Rh6G-FWLSC e (d, f) U5Eu-FWLSCs sob condições meteorológicas distintas; barras de escala de  $10^3$  m. Fonte: Adaptado de [34].

Os autores apontam que os guias de ondas cilíndricos possuem maior potencial em comparação com os guias de ondas planares por apresentarem fatores de concentração melhorados. Isso ocorre devido a razão de concentração de um LSC cilíndrico ser capaz de alcançar o dobro do valor de um guia de ondas plano quadrado de área e volume de coletas equivalentes, devido a razão de entre a área de absorção e coleta ser maior [34].

Um novo conceito de guia de onda leve, mecanicamente flexível de alto desempenho é proposto pelos autores [16]. O Concentrador solar é do tipo luminescente cilíndrico (LSCs) de fibras ópticas poliméricas (POFs) feita de Polimetilmetacrilato (PMMA) com revestimento de camada híbrida Orgânico-inorgânico dopado com  $\text{Eu}^{3+}$ , ver Fig. 2.29. O revestimento de POF com camada emissora permite a fabricação de forma fácil de LSCs em formato cilíndricos longos de custo reduzido e fabricação em larga escala [16].

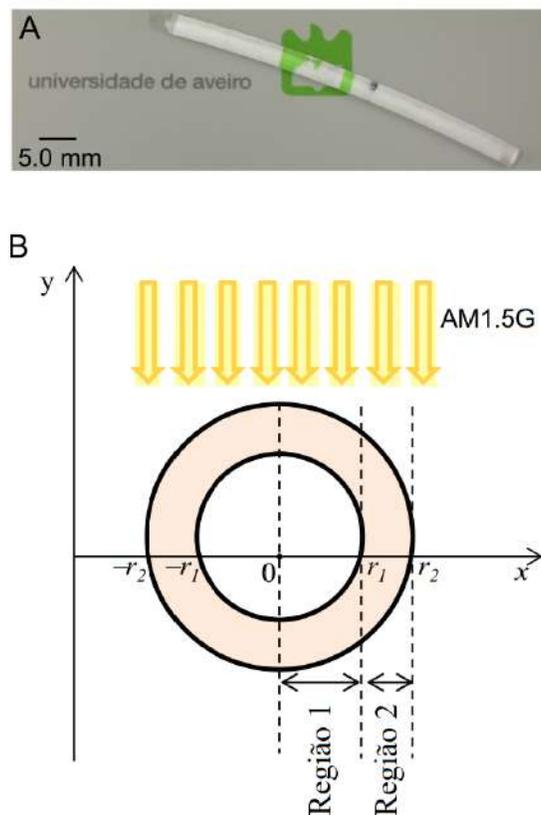


Figura 2.29: (A) Fotografia de um FWLSC em condições de luz do dia. (B) Esquema da representação da seção transversal. Fonte: Adaptado de [16].

O LSC cilíndrico produzido baseado em fibras comerciais de PMMA com revesti-

mento em uma camada, denominado LSCs de guia de onda de fibra (FWLSC). O FWLSC possui diâmetro igual  $3,0 \cdot 10^{-3}$  m e o POF baseado PMMA de índice de refração igual 1,49 Fig. 2.30 [16].

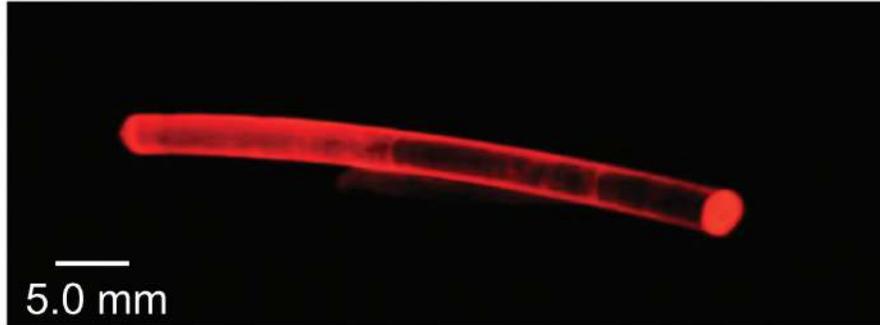


Figura 2.30: Fotografia do FWLSC sob iluminação UV (365 nm). Fonte: [16].

O estudo presente na literatura enfatiza que o dispositivo apresenta vantagens como, captar radiação em incidência direta e difusa, possui baixo custo, de fácil fabricação, flexível, apresenta alto desempenho e perdas insignificantes por autoabsorção e transporte. A eficiência de conversão óptica efetiva do LWLSC é cerca de 20,771% para os comprimentos de ondas de (300-380 nm) [16].

Na literatura um estudo apresenta um concentrador solar planar constituído de um concentrador primário (micro lente), concentrador secundário e células fotovoltaica. As microlentes são responsáveis por captar e focalizar a luz em um guia de ondas multimodo cônico. A luz propaga-se utilizando o fenômeno de reflexão interna total por meio do guia de onda até alcançar a célula fotovoltaica. Dessa forma, uma grande área de luz pode ser concentrada e acoplada a um sistema pequeno que a direciona para uma célula solar fotovoltaica de alta eficiência [17].

O sistema é constituído de um conjunto de lentes e de guia de onda de canal Fig. 2.31. A luz solar é coletada pelas lentes e acoplada aos guias de ondas. O dispositivo também conta com um acoplador de com inclinação de  $45^\circ$  alinhado no ponto-focal da lente, ele direciona a luz para os guias de ondas que posteriormente redireciona a célula fotovoltaica da na borda do guia de ondas [17].

O guia de onda do sistema é feito por corte a laser e o material utilizado foi PMMA, por ser um material transparente e apresentar baixa perda da faixa de luz visível. O sistema

possui as seguintes dimensões: 38 mm de diâmetro e distância focal de 12,3 centímetros para as lentes e os guias são de 3 mm x 3 mm x 10 cm. Fig. 2.32 [17].



Figura 2.31: O dispositivo de três sistema de guia de onda de lente para canal. Fonte: [17].

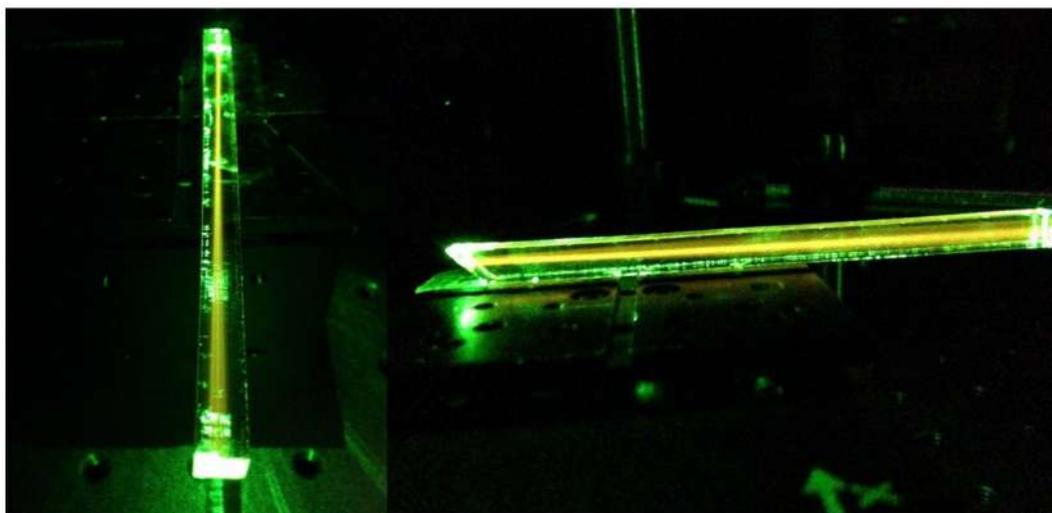


Figura 2.32: (a) Fotografia do guia de onda PMMA que é feito por corte a laser. Fonte: [17].

O sistema apresenta desempenho óptico de 69,6% e razão de concentração igual a 7.3X em simulação. Experimentalmente, a eficiência igual 62,8% e razão de concentração pode atingir 126x. O dispositivo apresenta perdas principalmente por acoplamento e reflexão de Fresnel. Um requisito importante deste estudo é a baixa perda por propagação de guia de onda [17].

A física por trás dos guias de ondas baseia-se no modelo de raios para a propagação

da luz. Modelo que explica de forma simples dois aspectos importantes da propagação da luz que são a reflexão e refração. A luz a incidi em uma superfície lisa que separa dois meios transparente de índice de refração diferentes parte da luz é refletida e parte é refratada (transmitida), veja na Fig. 2.33 [35].

A razão entre a velocidade da luz no vácuo  $c$  e a velocidade da luz em um meio material  $v$  resulta no índice de refração  $n$  do material ótico  $n = \frac{c}{v}$ . A luz propaga-se mais lentamente através de um material que no vácuo. Dessa forma, o índice de refração de qualquer material é sempre maior que 1 e igual a 1 para luz propagando-se no vácuo [35], [33].

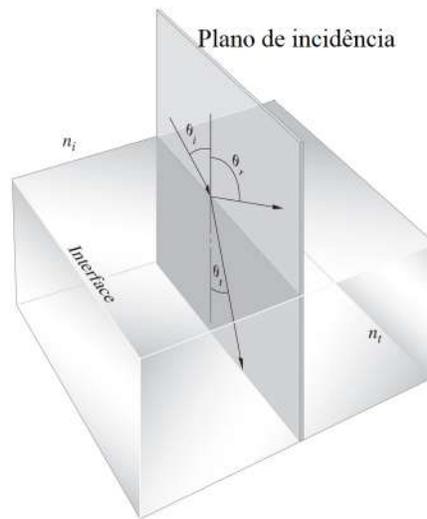


Figura 2.33: Os raios de luz incidente, refletido e transmitido estão cada um no plano de incidência. Fonte: Adaptado de [33].

Um feixe de luz ao incidi em uma interface entre dois meio de índice de refração diferentes como ar e vidro sofre reflexão. O ângulo de incidência  $\theta_i$  entre o raio incidente e a reta normal à interface é igual ao angulo, também em relação a reta normal, do raio refletido  $\theta_r$  [36]. Essa é a definição da lei da reflexão dada por

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.7)$$

O fenômeno da refração ocorre quando o raio de luz incidente na interface entra no material, o vidro por exemplo, a velocidade da luz é reduzida. Então o angulo do raio raio

refratado  $\theta_t$  é menor que o angulo do raio incidente  $\theta_i$ . Dessa forma, ocorre a inclinação do raio refratado em direção a normal [36]. O ângulo de refração  $\theta_t$  depende do ângulo de incidência e da velocidade relativa da luz no dois meios. Onde  $v_i$  velocidade da luz no meio incidente e  $v_t$  é a velocidade da luz no meio de transmissão, a relação entre o angulo de incidência e de refração é dada por:

$$\frac{1}{v_i} \text{sen}(\theta_i) = \frac{1}{v_t} \text{sen}(\theta_t) \quad (2.8)$$

A expressão é valida para refração de qualquer frequência da luz incidente em uma superfície que separa dois meios distintos. Relacionando-se as equações (2.7) e (2.8) obtém-se a lei de Snell para a refração

$$n_i \text{sen}(\theta_i) = n_t \text{sen}(\theta_t) \quad (2.9)$$

A física por trás da reflexão e refração pode ser entendido facilmente em termos da absorção e irradiação da luz pelos átomos no meio refletor ou refrator. A luz viajando pelo ar ao incidir em uma superfície de vidros, os átomos do vidro absorvem e irradiam a luz na mesma frequência em todas as direções. As ondas ao serem irradiadas interferem constritivamente em um ângulo igual ao ângulo de incidência produzindo a onda refletida [36].

A parte da onda transmitida é o resultado da interferência da onda incidente e da onda produzida pela absorção e irradiação da energia luminosa pelos átomos do meio. Para a luz que adentra o vidro a partir do ar, tem-se uma defasagem entre onda transmitida e a onda incidente. Esta defasagem é resultado do retardo entre a posição da crista da onda transmitida em relação á posição da crista da onda incidente no meio [35].

A Fig. 2.34 mostra em um meio  $a$  de índice de refração  $n_a$  uma fonte de luz da qual emanam diversos raios de luz em ângulo diferentes. Os raios incidem na interface que separa o meio  $a$  de um outro meio  $b$  de índice de refração  $n_b$ , onde  $n_a > n_b$ . Os raios não perpendiculares á interface desviam afastando-se da no normal [35, 36] .

Á medida que o angulo de incidência aumenta o angulo de refração aumenta até



Figura 2.34: Um feixe de luz entra na parte superior esquerda do aquário e, depois, reflete na parte inferior dos espelhos inclinados em diferentes ângulos. Um feixe sofre reflexão interna total na interface ar-água . Fonte: [35].

atingi o ângulo denominado como ângulo crítico  $\theta_c$ . Para ângulo maiores que o ângulo crítico não há refração, ou seja, toda a luz é refletida. Esse fenômeno é denominado reflexão interna total. O ângulo crítico pode ser obtido para os dois materiais  $a$  e  $b$  a partir da lei de Snell [36]:

$$\text{sen}(\theta_{\text{crít}}) = \frac{n_b}{n_a} \quad (2.10)$$

A fibra ótica é uma aplicação interessante da reflexão interna total que consiste na transmissão de um feixe de luz por meio de uma fibra de vidro longa, estreita e transparente. Quando um feixe de luz penetra na extremidade de uma barra transparente a luz sofre reflexão interna total se o índice de refração da barra for maior que o índice de refração do material existente em seu exterior. O funcionamento dos guias de ondas exploram esses mesmos princípios da óptica e eles funcionam de forma análoga à fibra ótica. Inclusive os guias de ondas são tecnologia precursora à fibra ótica [33, 36, 37].

Os guias de ondas de uma forma geral devem apresentar bom desempenho em termo de captação, direcionamento, transmissão e concentração da luz. O desempenho de um guia de ondas concentrador solar é quantificado pelo produto entre o fator de concentração e o desempenho óptico

$$F = \eta_o \cdot G \quad (2.11)$$

A eficiência óptica  $\eta_o$  é a razão entre a potência óptica de saída nas bordas do concentrador solar ( $P_{saída}$ ) e o potência óptica da luz incidente ( $P_{entrada}$ )

$$\eta_o = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (2.12)$$

O fator de ganho geométrico  $G$  é uma razão entre a área de captação da luz ( $A_s$ ) e as áreas de borda (destino da luz) ( $A_e$ ) do concentrador solar.

$$G = \frac{A_s}{A_e} \quad (2.13)$$

---

---

# CAPÍTULO 3

---

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Otimização

O Algoritmo Genético (AG) é a técnica mais popular em pesquisa na área de computação evolutiva. Esse é um método direto, estocástico, paralelo para busca global, otimização e aprendizagem, semelhante a evolução dos seres vivos descrita por Charles Darwin. Conforme a teoria da evolução de Darwin, geralmente um indivíduo mais apto de qualquer população possui mais chance de se reproduzir e sobreviver, melhorando assim, sucessivas gerações [38, 39].

Um algoritmo genético é um modelo computacional de evolução biológica. Os (AGs) são úteis como um método de busca de solução para problemas e também para modelar sistemas evolutivos. Nesses algoritmos as strings binárias são armazenadas na memória do computador e elas estão sujeitas a modificações ao longo do tempo, como ocorre com populações de indivíduos que evoluem por seleção natural. Mesmo com uma configuração computacional simplificada em comparação com o mundo real, os (AGs) evoluem surpreendentemente estruturas complexas (indivíduos) e interessantes. Esses indivíduos podem representar soluções de problemas, estratégias de jogos, imagens virtuais ou programas de computador [38, 39].

Seguindo a ideia da genética de população os (AGs) inicialmente criam uma população de indivíduos aleatoriamente. Cada indivíduo, pode ser pensado como uma solução candidata para algum problema de interesse. Variações entre indivíduos da população resultam em indivíduos mais adaptados, ou seja, melhores soluções do problema. As diferenças entre os indivíduos são utilizadas para influenciar a seleção de um novo conjunto de soluções possíveis no passo seguinte denominado seleção [39].

No decorrer da seleção uma nova população é criada gerando cópias, indivíduos mais bem sucedidos e os menos bem sucedidos são eliminados. Entretanto, as cópias não são exatas, pois podem sofrer mutações, cruzamentos no decorrer da operação de cópia. Ao transformar o conjunto anterior de bons indivíduos em um novo, a operação de cruzamento e mutação geram um novo conjunto de indivíduos, ou amostras, que idealmente possui a chance de ser melhor do que a média, que também é boa. Quando ocorre este ciclo de avaliação, seleção e operações genéticas repetidas várias vezes, a aptidão da população tende a melhorar, e os indivíduos na população representam "soluções" melhoradas para qualquer problema inserido na função aptidão [39]. A Fig. 3.1 apresenta de forma simplificada o processo realizado pelo (AG) ao resolver algum problema desejado.

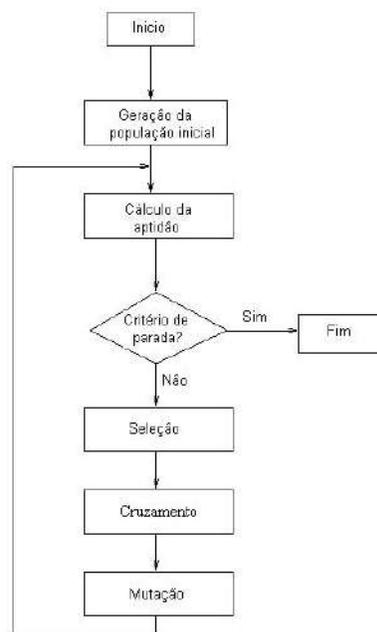


Figura 3.1: Fluxograma de algoritmo genético. Fonte: [40].

Um problema de otimização de uma forma geral refere-se a encontrar um máximo ou mínimo valor de uma função. Para exemplificar, um problema de otimização inclui maximizar a quilometragem de uma automóvel por litro de combustível ou minimizar a taxa de falha de um produto[40].

Neste estudo é realizado a otimização geométrica de um concentrador solar de lentes de cilíndricas e guias de ondas 3-D que explora o princípio da refração e reflexão interna total. A intenção do processo de otimização é maximizar o desempenho óptico do modelo proposto de concentrador solar.

O modelo de concentrador foi inicialmente modelado com o Comsol Multiphysics 5.5 e também analisado o desempenho óptico do dispositivo. Para a modelagem foram utilizados o método de elementos finitos, módulos de óptica de raios. Na modelagem foram utilizados os seguintes materiais: vidro de sílica e água como fluido de trabalho. A Fig. 3.2 apresenta o design do concentrador em duas dimensões.

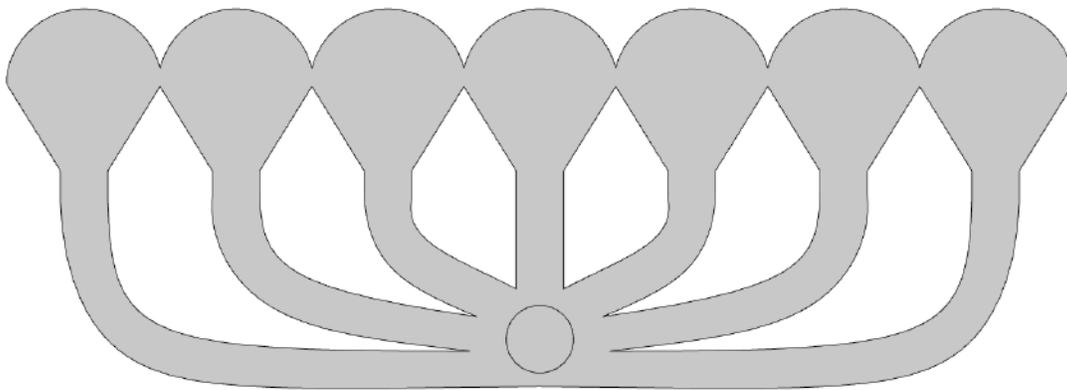


Figura 3.2: Modelo do concentrador solar proposto 2-D.

A estrutura superior do dispositivo, em que ocorre a concentração solar foi construída a partir lentes cilíndricas presentes na biblioteca de peças do COMSOL. Os guias de onda foram construídos a partir das curvas cúbicas de Bézier. Curva de Bézier é uma curva polinomial expressa pela interpolação linear entre pontos denominados pontos de controle. Ela é amplamente utilizada em desenho geométricos assistidos por computador e computação gráfica para modelar curvas e superfícies. Essa é uma ferramenta poderosa para construção de superfícies e curvas de forma livre.

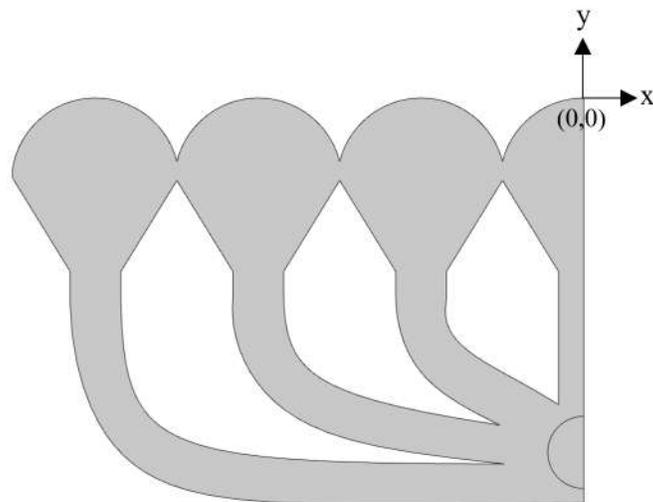


Figura 3.3: Lado esquerdo da geometria a ser otimizada.

Por apresentar simetria em relação ao eixo vertical o modelo do concentrador foi construído em duas partes a primeira corresponde ao lado esquerdo mostrado na Fig. 3.3. Posteriormente o lado direito foi construído utilizando o recurso de espelhamento disponível no COMSOL formando o sistema de sete lentes e setes guias de ondas apresentado na Fig. 3.2.

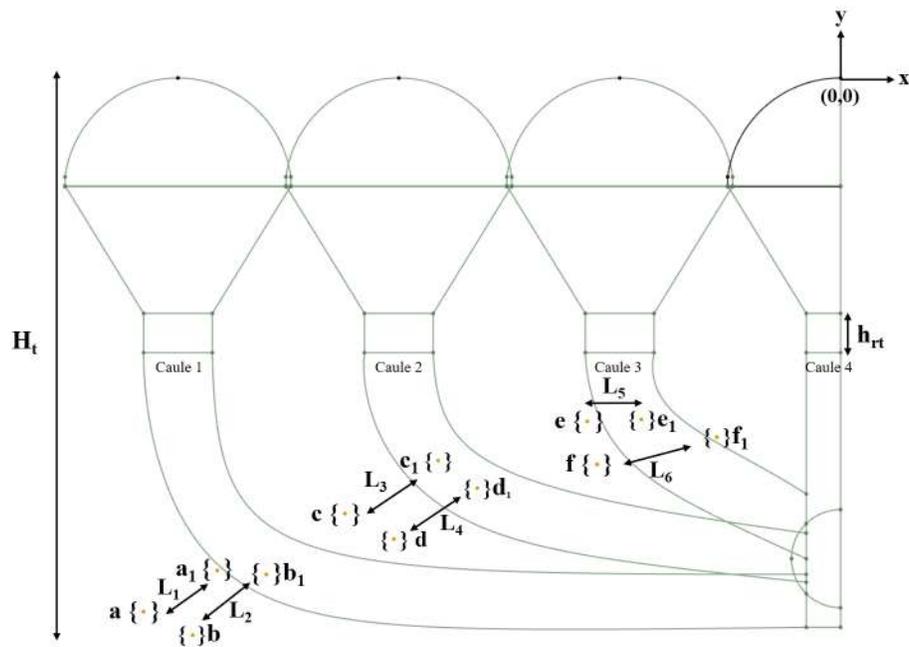


Figura 3.4: Parâmetros da geometria do concentrador solar a serem otimizados.

Partindo dessa ideia, os parâmetros de interesse da geometria do dispositivo são

definidos a partir do sistema de coordenadas  $x$  e  $y$  apresentado na Fig. 3.3. Na Fig. 3.4 são apresentados os pontos de interesse que compõem a estrutura da geometria do concentrador e solar. A posição desses pontos será ajustada pelo algoritmo genético de forma a otimizar a geometria do coletor buscando o melhor desempenho óptico para o dispositivo. Os parâmetros de interesse para a otimização geométrica são:  $a$ ,  $a_1$ ,  $b$ ,  $b_1$ ,  $c$ ,  $c_1$ ,  $d$ ,  $d_1$ ,  $e$ ,  $e_1$ ,  $f$ ,  $f_1$ ,  $H_{yt}$  e  $h_{rt}$ . A Tabela 3.1 apresenta os parâmetros e as expressões que as definem.

Ao todo 14 variáveis são utilizadas para a otimização da geometria do coletor as seis primeiras são  $a_{y0}$ ,  $b_{y0}$ ,  $c_{y0}$ ,  $d_{y0}$ ,  $e_{y0}$ ,  $f_{y0}$ , elas correspondem as variáveis para cada um dos pontos na componente  $y$ . As próximas variáveis são  $L_{1x}$ ,  $L_{2x}$ ,  $L_{3x}$ ,  $L_{4x}$ ,  $L_{5x}$  e  $L_{6x}$  elas correspondem as componentes  $x$  das distancias  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ,  $L_4$ ,  $L_5$  e  $L_6$  que separam os pontos. Finalmente tem-se as duas últimas variáveis  $H_t$  que correspondem a altura total da geometria e a  $h_{rt}$  que é a altura dos retângulos que conectam os caules às bases das lentes.

Tabela 3.1: Parâmetros utilizados na otimização do concentrador solar

<b>Parâmetros de otimização</b>			
<b>Parâmetros</b>	<b>Coordenadas (<math>x</math>, <math>y</math>)</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Coordenadas (<math>x</math>, <math>y</math>)</b>
<b>a</b>	$(a_x, a_{0y} + H_{yt})$	<b>a<sub>1</sub></b>	$(a_x + L_{1x}, a_y + L_{1y})$
<b>b</b>	$(b_x, b_{0y} + H_{yt})$	<b>b<sub>1</sub></b>	$(b_x + L_{2x}, b_y + L_{2y})$
<b>c</b>	$(c_x, c_{0y} + H_{yt})$	<b>c<sub>1</sub></b>	$(c_x + L_{3x}, c_y + L_{3y})$
<b>d</b>	$(d_x, d_{0y} + H_{yt})$	<b>d<sub>1</sub></b>	$(d_x + L_{4x}, d_y + L_{4y})$
<b>e</b>	$(e_x, e_{0y} + H_{yt})$	<b>e<sub>1</sub></b>	$(e_x + L_{5x}, e_y + L_{5y})$
<b>f</b>	$(f_x, f_{0y} + H_{yt})$	<b>f<sub>1</sub></b>	$(f_x + L_{6x}, f_y + L_{6y})$
<b>H<sub>t</sub></b>	$H_0 + H_{yt}$	<b>h<sub>rt</sub></b>	$h_{rt0} + h$
<b>L<sub>1</sub></b>	$(L_{1x}, L_{1y})$	<b>L<sub>4</sub></b>	$(L_{4x}, L_{4y})$
<b>L<sub>2</sub></b>	$(L_{2x}, L_{2y})$	<b>L<sub>5</sub></b>	$(L_{5x}, L_{5y})$
<b>L<sub>3</sub></b>	$(L_{3x}, L_{3y})$	<b>L<sub>6</sub></b>	$(L_{6x}, L_{6y})$

Definidos os parâmetros da geometria e seus valores iniciais, variáveis e os limites de máximo e mínimo para as variáveis dadas as posições de cada ponto. .

O processo de otimização foi realizado utilizando o Matlab e o Comsol Multiphysics. O Matlab foi conectado ao Comsol, através dele foi realizada a otimização com o algoritmo genético. Dessa forma para a otimização utilizou-se métodos de elemento finitos, módulo de óptica de raios e algoritmo genético. No Matlab foi criado um programa responsável pela otimização com o uso do algoritmo genético. Ele responsável por selecionar os valores de posição, de forma aleatória, dentro do seu espaço de busca definido entre os limites de máximo e mínimo pré-estabelecidos no algoritmo, então envia esses valores ao Comsol que simula a geometria e calcula a eficiência óptica para os valores de posição definidos pelo AGs e enviar o resultado da eficiência óptica para o Matlab. Dessa forma, os dois softwares comunicam-se realizando a otimização, ou seja, maximizando o desempenho óptico do coletor solar.

## 3.2 O Modelo

O modelo de concentrador solar proposto, neste estudo, foi construído por completo utilizando o modulo de geometria óptica do Comsol. Para a construção do modelo foi utilizado inicialmente uma lente plano convexa da biblioteca de peças do software. O formato da lente apresentado na Fig. 3.5 foi obtido a partir dos seguintes parâmetros: altura  $HL = 23$  mm, raio  $R = 11.6$  mm, espessura de borda  $TE = 1$  mm. A orientação dos raios de luz incidentes sobre a lente na direção  $-y$  é definida por  $n_{ix} = 0$  e  $n_{iy} = -1$ .

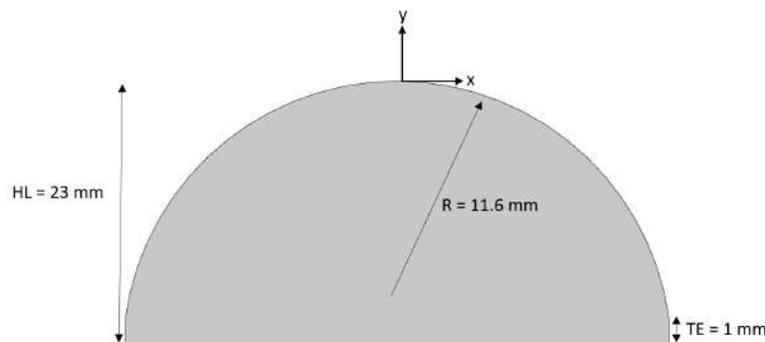


Figura 3.5: Lente plano-convexa 2-D.

Uma base foi construída a partir da lente para conexão da mesma com os guias de

ondas. Após esse passo a estrutura apresentada na Fig. 3.6 foi replicada 3 vezes para se obter o sistema de 3.5 lentes.

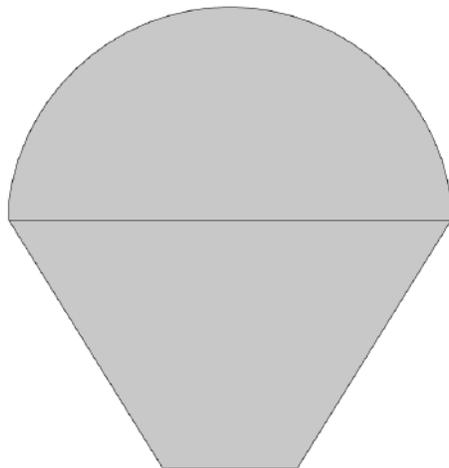


Figura 3.6: Lente plano-convexa 2-D com base.

Com a replicação da estrutura apresentada na Fig. 3.6 é obtida a geometria mostrada em Fig. 3.7. A partir dessa estrutura pode-se construir os guias de ondas.

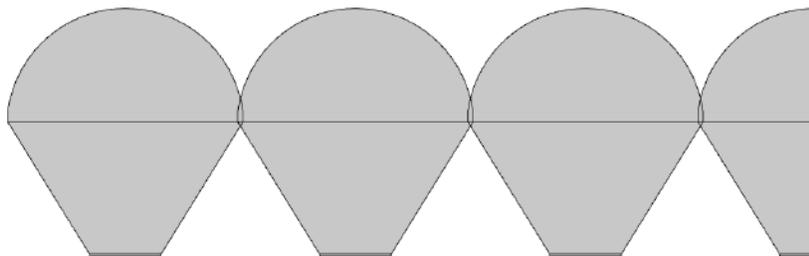


Figura 3.7: Sistema com 3.5 lentes 2-D.

Para a construção dos guias de ondas foram utilizadas as curvas cúbicas de Bézier. Por proporcionar maior liberdade e flexibilidade na construção da geometrias curvas como é o caso dos guias de ondas apresentados na Fig. 3.8. A cubeta foi construída inserindo um círculo de raio igual a 5 mm.

A estrutura concentrador apresenta simetria em relação ao eixo Y, por isso foi construída primeira o lado esquerdo da concentrador proposto. Em seguida foi feita uma copia da estrutura e na sequencia ela foi espelhada em relação ao eixo Y e assim se obteve a geometria

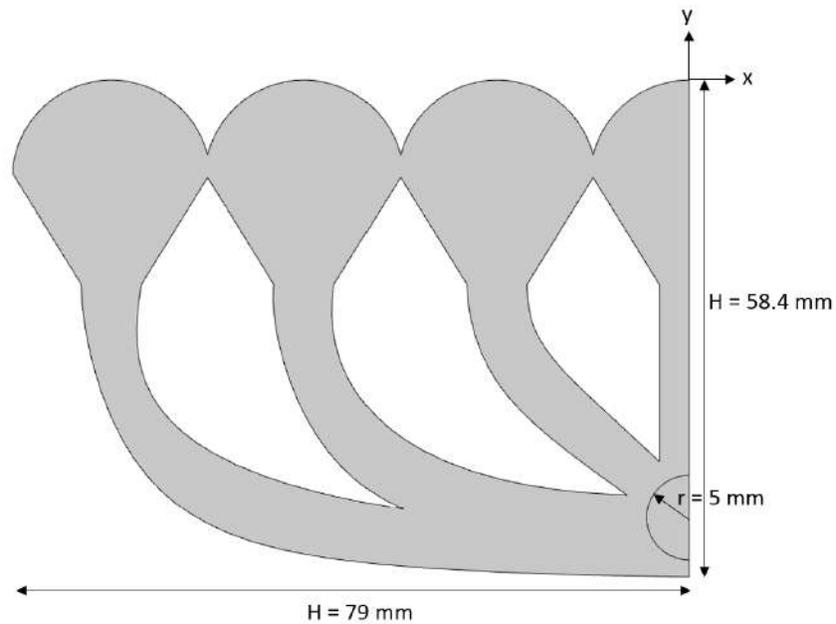


Figura 3.8: Sistema com 3.5 lentes 2-D.

completa do concentrador solar de 7 lentes e 7 guias de ondas 2-D apresentada na Fig. 3.9.

Com a estrutura 2-D, pertencente a plano x-y, pronta pode-se construir o design em três dimensões para isso é necessário utilizar a função “*Extrude*” no Comsol. Na qual defini-se o valor de medida para terceira dimensão que corresponde a profundidade da geometria.

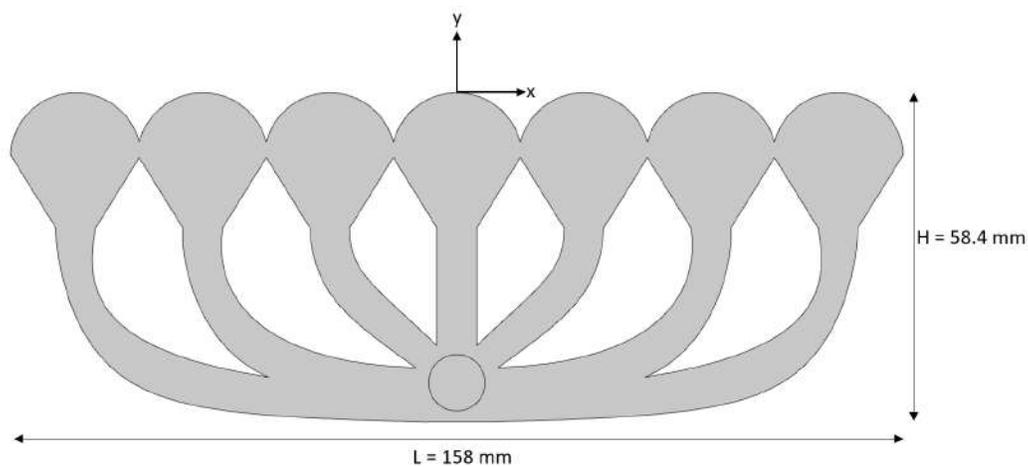


Figura 3.9: Sistema com 7 lentes 2-D otimizado.

A Fig. 3.10 mostra a geometria do concentrador solar em 3 dimensões com a dimensão  $z = 30$  mm. Os parâmetros utilizados para a construção desse modelo de concentrador

solar são os obtidos na otimização do mesmo.

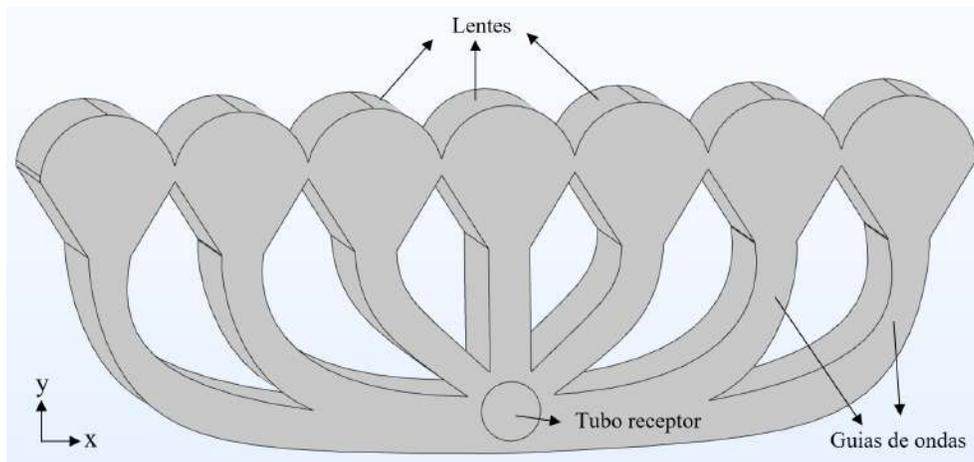


Figura 3.10: Sistema com 7 lentes e 7 guias de ondas em 3-D otimizado.

### 3.3 Análise Óptica

A análise óptica do concentrador solar com guia de ondas é feita pelo Método dos Elementos Finitos (FEM) através do software COMSOL Multiphysics com o módulo de óptica de raios. Em anexo o passo a passo da construção da geometria e da definição das condições de contorno, e as configurações para obtenção dos resultados.

O material adotado para o concentrador é o vidro de sílica devido à sua transparência na faixa do visível, resistência ao calor e estabilidade química. O índice de refração do vidro é de 1,55 para todos os comprimentos de onda analisados.

Todo o concentrador possui em 3-D dimensões de 158 mm x 58.4 mm x 30 mm. Cada lente tem um raio de 11,6 mm e os guias de onda têm 38 mm de altura e 7 mm de largura. O tubo receptor tem um raio de 5 mm e 30 mm de comprimento. As lentes cilíndricas plano-côncavas focam a luz ao longo de um eixo focal linear, com uma distância focal de 43,6 mm.

A análise óptica foi feita, inicialmente, para o sistema em 2-D para reduzido o tempo de simulação e custo computacional. Ao final foi realizado a análise do sistema em 3-D em termo de eficiência óptica. A Fig. 3.11 mostra os materiais e dimensões do coletor em duas

dimensões.

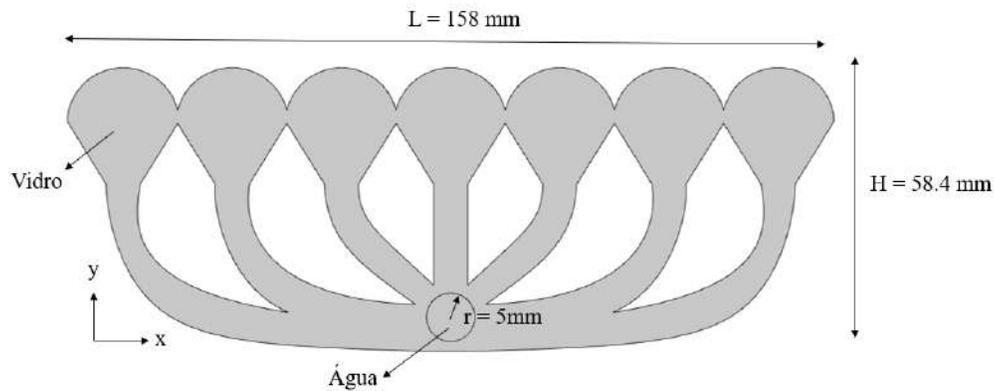


Figura 3.11: Materiais e dimensões do concentrador solar de 7 lentes cilíndricas.

Como o sistema apresenta simetria em relação ao eixo  $y$  o sistema foi dividido ao meio e analisado o lado esquerdo, a parte do sistema e em seguida o lado direito. Para evitar perdas ópticas interfaciais e manter a uniformidade do índice de refração no dispositivo, o concentrador é projetado como uma única estrutura em massa. Além disso, utilizou-se as funções cúbicas de Bézier para gerar as conexões de lentes, guias de onda e o tubo receptor.

A malha de elementos finitos, é gerada pela ferramenta “*User-controlled mesh*” do COMSOL, que é controlada pelo usuário. Por conta da complexidade da geometria e do estudo faz necessário um maior refinamento da malha de elemento finitos.

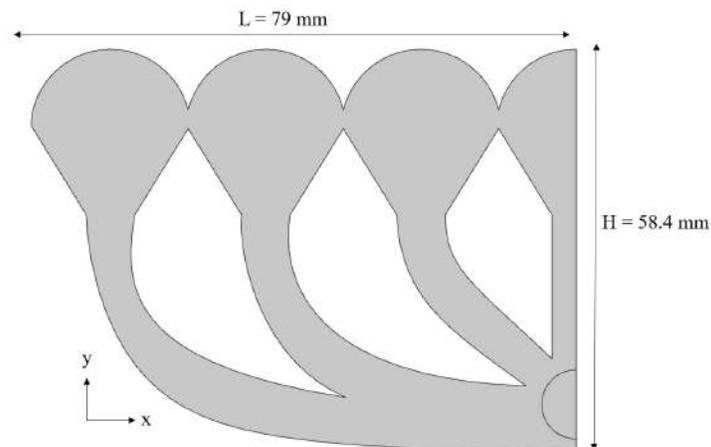


Figura 3.12: Sistema de 3.5 lentes esquerdo do concentrador solar lado lado esquerdo.

Inicialmente a malha, apresentada na Fig. 3.13, foi pre-definida com “*Finer*” (mais

finas) pelo usuário e posteriormente os parâmetros foram refinados utilizando-se os seguintes parâmetros: tamanho máximo da malha, tamanho mínimo, taxa de crescimento do elemento, fator de curvatura e resolução em regiões estreitas.

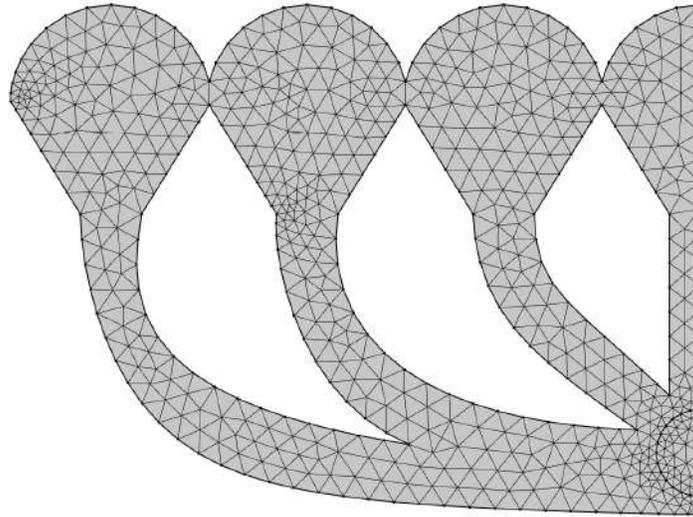


Figura 3.13: Malha de elementos finitos do lado esquerdo.

A Fig. 3.14 mostra o lado esquerdo da geometria e sua malha de elementos finitos. A análise será a mesma dados os mesmo parâmetros para as duas estrutura. Os resultados para ambos o lados também devem os mesmos. As dimensões para o lado direito são as mesmas para o lado esquerdo apresentadas na Fig. 3.12.

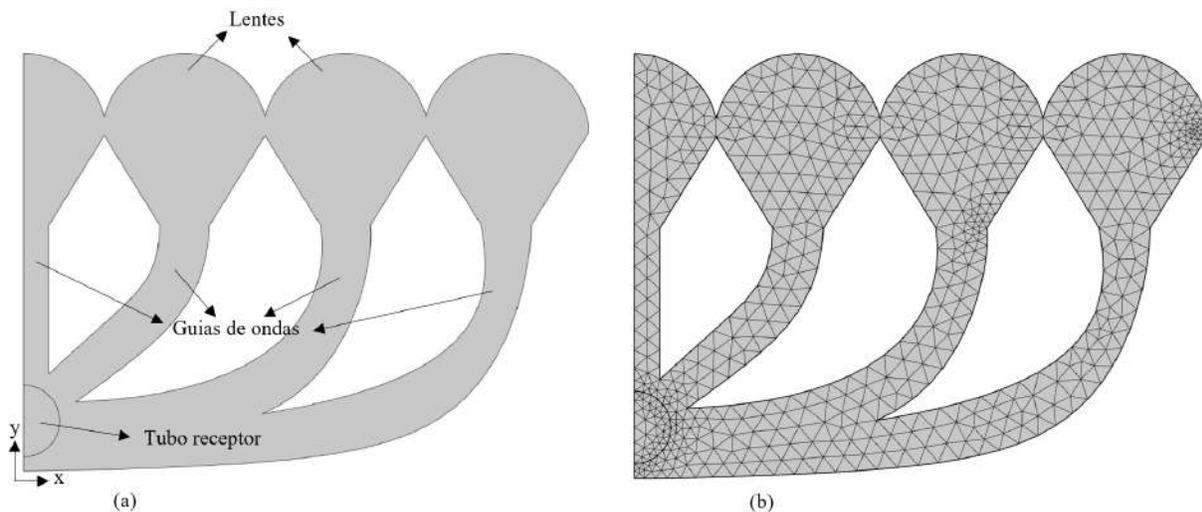


Figura 3.14: Sistema de 3.5 lentes (a) e malha de elementos finitos(b) do lado direito.

Como o sistema possui dimensões de ordens de grandeza maiores que o comprimento de onda da radiação incidente, a propagação da luz é descrita por meio de óptica geométrica. O módulo óptico de raios do COMSOL analisa o caminho óptico, a intensidade e a fase dos raios de luz incidentes. Adotou-se uma pupila de entrada linear, já que os sistemas em análise são bidimensionais, acima do concentrador, e a posição inicial dos raios é definida pelo vetor  $\mathbf{q}$ :

$$\mathbf{q} = q_x + q_y \quad (3.1)$$

Para o caso do estudo desses sistemas em três dimensões deve-se adotar uma pupila retangular e adicionar a componente  $z$  aos vetores  $\mathbf{q}$  e  $\mathbf{L}_0$ . O caminho dos raios é definido pelo vetor  $\mathbf{L}_0$ , que é expresso por seus componentes como:

$$\mathbf{L}_0 = L_x + L_y \quad (3.2)$$

Por exemplo, para descrever os raios de luz na direção vertical (eixo  $y$  negativo), assumimos os valores  $L_x = 0$  e  $L_y = -1$ . Caso o sistema seja em três dimensões é só adicionar a terceira componentes dos vetores na expressões onde for necessário.

O software realiza o estudo com base na física descrita pela Lei de Snell, Equações de Fresnel e Parâmetros de Stokes. Assim, o campo elétrico da onda eletromagnética é representado como:

$$\mathbf{E} = \mathbf{a}e^{i\psi} \quad (3.3)$$

Onde  $\mathbf{a}$  é a variação lenta da amplitude e  $\psi$  é uma função do vetor posição  $\mathbf{q}$  e do tempo  $t$ . Para análise de campo distante, a fase é expressa como:

$$\Psi = \mathbf{a} \cdot \mathbf{q} - \omega t + \alpha \quad (3.4)$$

Onde  $\mathbf{k}$  é o vetor de onda,  $\omega$  é a frequência angular e  $\alpha$  é um deslocamento de fase arbitrário. Em um meio isotrópico, o vetor de onda e a frequência angular estão relacionados pela seguinte expressão:

$$\omega = \frac{c|\mathbf{k}|}{n(\mathbf{q})} \quad (3.5)$$

Assim, a trajetória dos raios pode ser obtida resolvendo o sistema de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem acopladas para os componentes  $\mathbf{k}$  e  $\mathbf{q}$ :

$$\frac{\partial \mathbf{k}}{\partial t} = -\frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{q}} \quad (3.6)$$

e

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} = \frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{k}} \quad (3.7)$$

Além disso, o vetor de onda normalizado é obtido como:

$$\mathbf{k} = \frac{\omega n \mathbf{L}_0}{c|\mathbf{L}_0|} \quad (3.8)$$

Onde  $c$  é a velocidade da luz e  $n$  é o índice de refração.

As interfaces entre materiais com diferentes índices de refração definem as condições de contorno. O concentrador proposto é feito de vidro com índice de refração de  $n_2 = 1,55$  e está imerso no ar ( $n_1 = 1$ ). Quando um raio de luz atinge a interface ar-vidro, a modificação no vetor de onda é descrita pela Lei de Snell, tal que o ângulo de incidência ( $\theta_i$ ) é calculado por:

$$\theta_i = a.\cos\left(\frac{n_i \cdot n_s}{|n_i| \cdot |n_s|}\right) \quad (3.9)$$

Onde  $n_i$  é o vetor unitário na direção do incidente e  $n_s$  é o vetor perpendicular à superfície. Considerando materiais isotrópicos e não absorventes, a direção do raio refratado  $n_t$ , é dada como:

$$\mathbf{n}_t = \eta \mathbf{n}_i + \gamma \mathbf{n}_s \quad (3.10)$$

Em que os parâmetros  $\theta$  e  $\gamma$  são obtidos como:

$$\eta = \frac{n_1}{n_2} \quad (3.11)$$

$$\gamma = -\eta \cos(\theta_i) + \cos(\theta_t) \quad (3.12)$$

À medida que o raio se propaga em materiais não absorventes, os valores de  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $\theta_i$  e  $\theta_t$  são reais, e o ângulo do raio refratado é calculado como :

$$\theta_t = \text{asin}(\eta \sin(\theta_i)) \quad (3.13)$$

O princípio de funcionamento do guia de ondas do concentrador é o mesmo da fibra óptica, em que o núcleo da fibra possui índice de refração maior que o revestimento. Assim, o concentrador funciona pela reflexão interna total produzida pela geometria projetada e pela diferença entre os índices de refração do vidro e do ar, ver na Fig. 3.15. Analisamos a luz em diferentes comprimentos de onda na faixa do visível: 460, 480, 500, 530, 600 e 650 nm.

Além disso, o desempenho do concentrador é avaliado por sua razão de concentração ( $CR$ ) e eficiência óptica ( $\eta_{opt}$ ). O  $CR$  é obtido como a razão entre a intensidade da radiação solar na superfície do receptor ( $I_S$ ) e a intensidade na superfície superior do coletor ( $I_R$ ):

$$CR = \frac{I_R}{I_S}. \quad (3.14)$$

A eficiência óptica é obtida pela razão entre a potência da radiação  $P_{out}$  que atinge o tubo receptor e a potência da radiação  $P_{int}$  incidente na lente do concentrador solar, como:

$$\eta_{opt} = \frac{P_{out}}{P_{in}}. \quad (3.15)$$

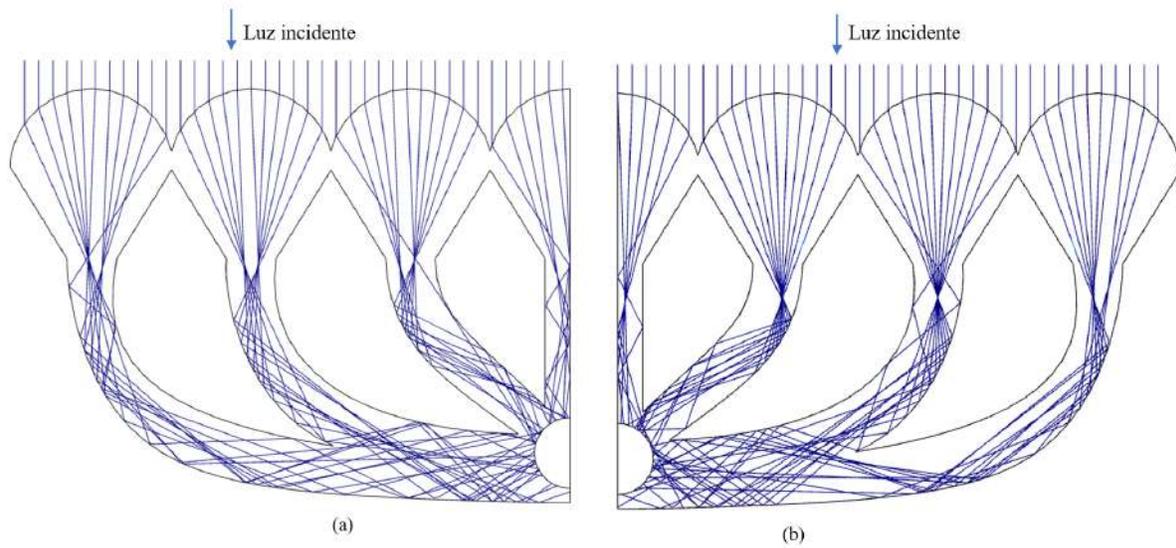


Figura 3.15: Traçado de raios dos dois sistemas de 3.5 lentes esquerdo (a) e direito (b).

---

---

# CAPÍTULO 4

---

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Análise Térmica

Na análise térmica do concentrador solar foram utilizados os módulos de transferência de calor e absorção de radiação. Nessa etapa do estudo é feita a conexão entre o módulo de óptica de raios, absorção de radiação e transferência de calor. A malha de elementos finitos (FEM) utilizadas foi a mesma da análise óptica.

Por meio do módulo de óptica de raios são estudados a intensidade, o caminho óptico dos raios de luz através da geometria do concentrador solar, a eficiência óptica e razão de concentração do coletor solar. Para esses estudos são computados pelo COMSOL a potência e a intensidade da luz. O processo de otimização do concentrador também ocorreu com o uso desse módulo.

O sistema de lentes intercepta, na superfície superior do concentrado, um valor intensidade luminosa  $I_s$  igual a  $1000W/m^2$ . A estrutura do concentrador, feita em vidro, é considerada não absorvedora de luz. Como a superfície superior do coletor que intercepta a luz é muito maior que a superfície do tubo receptor onde a luz sera absorvida. Devido razão de concentração óptica  $CR_o$  a intensidade luminosa  $I_r$  que chegar a tubo receptor aumenta.

Então o valor da intensidade luminosa que incide no tubo receptor é dada por:

$$\mathbf{I}_r = \mathbf{I}_s.CR_o \quad (4.1)$$

O módulo de absorção é responsável por estudar a absorção da radiação que incide no tubo receptor. Nessa etapa do estudo feita a conexão entre o módulo de óptica de raios por meio da variável acumuladora (*gop.wall1.bacc1.rpb\_sum*) [41] que computa a intensidade da luz que incide no tubo receptor. A análise de absorção óptica foi feita somente para o tubo receptor onde se encontra o fluido de trabalho e a estrutura do concentrador foi considerada como não-absorvedora. Isso porque o módulo de absorção não considera reflexão e refração no interior meio absorvente.

A intensidade da luz absorvida é obtida através de uma derivada de valor médio feita pelo próprio COMSOL para o volume do tubo receptor. Ao realizar essa operação ela armazenar o valor da intensidade luminosa absorvida na variável (*rbam.Itot*) [42].

Um feixe de radiação eletromagnética, constituído por um fluxo de fótons, ao incidir sobre um corpo transparente e uniforme, parte de sua intensidade é transmitida e uma parte é absorvida. A física por trás absorção da intensidade da radiação é descrita pela lei de Lambert-Beer expressa por [43]:

$$\mathbf{I}_{(\lambda)} = \mathbf{I}_0 e^{-\alpha_{(\lambda)}l} \quad (4.2)$$

Onde  $\mathbf{I}_0 = \mathbf{I}_r$  é a intensidade da luz incidente,  $\alpha_{(\lambda)}$  é o coeficiente de absorção do meio e  $l$  é caminho óptico médio. O coeficiente de absorção em função de comprimento de onda  $\lambda$  do espectro solar para o fluido homogêneo é descrito como:

$$\mathbf{Q} = \int_{\lambda_i}^{\lambda_f} I_{(\lambda)} \alpha_{(\lambda)} d\lambda \quad (4.3)$$

Essa expressão permite quantificar a contribuição energética de cada um dos comprimentos do espectro solar entre  $\lambda_i$  e  $\lambda_f$ , definidos entre 300 e 1200 nm, que serão absorvidos

pelo fluido de trabalho aquecendo-o. O  $Q$  é a densidade de potência que corresponde é a energia absorvida que será convertida em calor.

No módulo de transferência de calor é investigado o processo de aquecimento do fluido de trabalho a partir da radiação absorvida e a transferência do calor. A conexão entre os módulos de transferência de calor e o módulo de absorção ocorreu por meio de uma variável acumuladora (*rbam.Itot*) [42] que guarda o valor da intensidade absorvida calculada pela derivada de valor médio do volume.

A equação de energia para a fonte de calor, desconsiderando fluxo de fluido é dada por:

$$\kappa \nabla^2 T - Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.4)$$

Onde  $\kappa$  é o coeficiente de condutividade térmica,  $T$  a temperatura,  $\rho$  a densidade da água e  $c$  o calor específico da água. Devido esse estudo desconsiderará fluxo de fluido.

Em virtude das diferença de temperatura entre o tubo receptor e o ambiente ocorre perda de calor por convecção. Fluxo de calor por convecção é proporcional a diferença de de temperatura entre a estrutura do concentrador e o ambiente. A perda de calor é descrita por:

$$q = h(T - T_{amb}) \quad (4.5)$$

O valor de  $h$  foi calculado diretamente no COMSOL, pelo módulo de transferência de calor, e é dado pela expressão [44]:

$$h = \frac{k}{D} \left( 0,3 + \frac{0,6 R_{eD}^{\frac{1}{2}} P_r^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + \left(\frac{0,4}{P_r}\right)^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \left(1 + \left(\frac{R_{eD}}{282000}\right)^{\frac{615}{5}}\right)^{\frac{4}{5}} \right) \quad (4.6)$$

Onde  $D$  é o diâmetro do cilindro,  $P_r = \frac{\mu C_p}{k}$  que é o número de Prandtl,  $R_{eD} = \frac{\rho U D}{\mu}$  o

número de Reynolds e  $\mu$  dinâmica de viscosidade. Os parâmetros de entradas no COMSOL para o cálculo do valor de  $h$  são  $U$  a velocidade do fluido e  $D$  o diâmetro do cilindro.

Então a eficiência térmica do concentrador pode ser calculada pela relação de conservação de energia. Na qual  $Q_u$  é a energia útil, parte da energia luminosa que se converteu em térmica e  $Q_s$  energia total disponível. A energia útil pode ser calculada por meio da expressão:

$$Q_u = mc(T_f - T_i) \quad (4.7)$$

Onde  $m$  é a massa,  $c$  é o calor específico do fluido,  $T_f$  temperatura final do fluido e  $T_i$  temperatura inicial do fluido e  $T_i = T_{amb}$ . A energia total disponível é obtida por:

$$Q_s = IA\Delta t \quad (4.8)$$

Onde  $\Delta t$  é intervalo de tempo para a variação de temperatura  $T_f - T_i$ ,  $A$  é a área da superfície do tubo receptor na qual a luz incide e  $I$  é a intensidade luminosa. Então a eficiência térmica pode ser obtida a partir da razão entre  $Q_u$  e  $Q_s$  é obtida por:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_s} = \frac{mc(T_f - T_i)}{IA\Delta t} \quad (4.9)$$

---

---

# CAPÍTULO 5

---

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Óptica

No estado da arte referentes a guias de ondas foram identificados diversos modelos de concentradores solares. A maioria dos modelos identificados utilizam sistema de rastreamento solar de eixo único ou dois eixos. Os materiais geralmente empregados na construção desses coletores são o PMMA e PMDS. Além disso, eles captam a luz em incidência direta e difusa e a focaliza em um ponto ou ao longo de um eixo.

Os dispositivos que possuem a tecnologia de guias de ondas não são construídos em estrutura única em massa. Neles estão presentes perdas ópticas por reflexão, absorção, conexão entres partes e alta sensibilidade ao ângulo de incidência solar.

Os guias de onda maciços têm sido aplicados principalmente em sistemas fotovoltaicos que contam com células solares de autodesempenho com a intenção de garantir iluminação intensa e uniforme sobre as células, aplicações fotoquímicas e iluminação de ambientes com luz natural. Alguns modelos de concentradores solares contam com sistema de lentes que concentra a luz sobre umas das extremidade de um guia de ondas que confinam e direcionam a luz.

Na Tabela 5.1 são apresentados a eficiência óptica e razão de concentração de alguns modelos de concentradores solares que contam com guias de ondas e são feitos em materiais transparentes. Em comparação com eles o modelo de concentrador proposto apresenta maior eficiência óptica e razão de concentração mostrando grande potencial para aplicações na área dos coletores solares.

Tabela 5.1: Concentradores solares feitos em materiais transparentes

Referência	Eficiência óptica e razão de concentração de diferentes concentradores		
	Modelo de concentrador	Eficiência óptica	Razão de concentração
[45]	Concentrador Solar Luminescente (LSC)	42.0%	–
[34]	Concentrador Solar Luminescente (LSC)	72,0%	12,3x
[15]	Concentrador Parabólico Composto (CPC)	85.7%	–
[17]	Concentrador de Guia de Onda Lente-a-Canal	69,6%	7,3x
[46]	Concentrador Solar de Guia de Onda Baseado em Luz Separada Espectralmente	73,0%	5,0x
[47]	Concentrador Solar Luminescente (LSC)	33,2%	–
Autor	Concentrador Solar de Lentes Cilíndricas e Guias de Ondas	94,0%	19,0x

O concentrador solar proposto neste estudo conta com 7 lentes cilíndricas e 7 guias de ondas feitos em estrutura única em massa para evitar perdas por reflexão, conexão e apresenta baixa sensibilidade ao ângulo de incidência solar. Dessa forma não necessita de sistema de rastreamento solar. O design do concentrador é projetado para focalizar a luz ao longo de um eixo no qual esta posicionado um tubo receptor.

A partir das Fig. 5.1(a) e Fig. 5.1(b) é possível perceber as diferenças entre as

geométricas não otimizada e otimizado para o sistema de 7 lentes e 7 guias de ondas, respectivamente. Dentre elas estão a altura e a curvaturas dos guias de ondas mais suaves para o sistema otimizado.

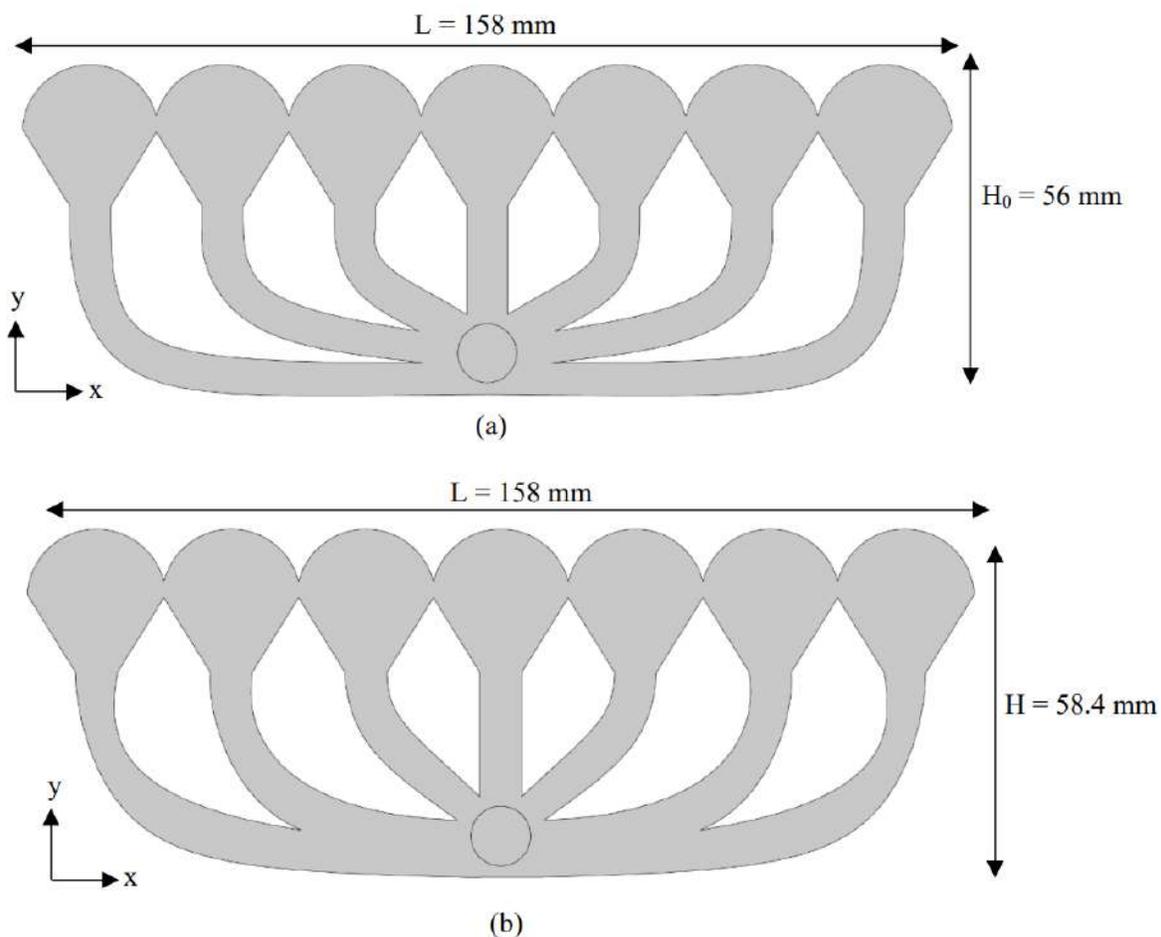


Figura 5.1: Sistema de 7 lentes não otimizado (a) e otimizado (b) .

Por apresentar simetria o sistema de sete lentes foi dividido em duas partes verticalmente, cada uma possui 3.5 lentes, e então foram analisadas as eficiências ópticas e razões de concentração de cada uma separadamente e posteriormente foi estudado o sistema completo.

Na análise realizada em cada um dos subsistemas de lentes foi obtido o valor da eficiência óptica, para luz em incidência normal do coletor, em torno 92% e razão de concentração em torno de 9,6. A partir desse resultado é esperado que a razão de concentração do sistemas com 7 lentes esteja em torno de 19,2. Uma vez que cada subsistema ao formar a estrutura completa tem contribuição no valor da razão de concentração e consequente

aumento na intensidade luminosa que chega no tubo receptor.

A Fig. 5.2 apresenta o gráfico da eficiência óptica do concentrador solar de 7 lentes cilíndrica em função do ângulo de inclinação da órbita relativa do sol. A eficiência máxima do concentrador é de aproximadamente 94% em incidência normal ao dispositivo. Ainda a partir do gráfico é notório que a eficiência óptica do coletor entre os intervalo de ângulos de -5 e 5 graus está acima de 80%. Dessa forma nota-se que o modelo de concentrador proposto possui baixa sensibilidade ao ângulo de incidência solar.

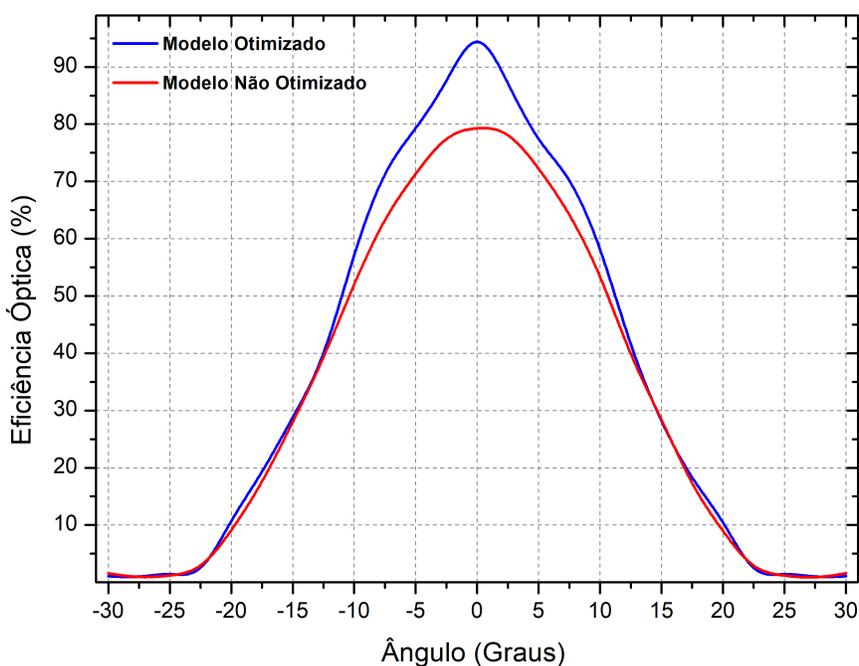


Figura 5.2: Análise de direcionalidade dos raios solares incidentes sobre o concentrador solar otimizado e não otimizado.

A eficiência do coletor sem otimização era de 79,0% com o processo de otimização a eficiência óptica aumentou para 94,0% para o sistema de 7 lentes para luz em incidência normal ao coletor, ver na Fig. 5.3. Para cada uma das partes simétricas do coletor solar a intensidade luminosa na cubeta, em relação a intensidade na superfície superior, aumentou em torno de 9,6x. O sistema completo com sete lentes apresentou na cubeta um aumento na intensidade luminosa de aproximadamente 19x evidenciando a contribuição de cada parte no valor total razão de concentração.

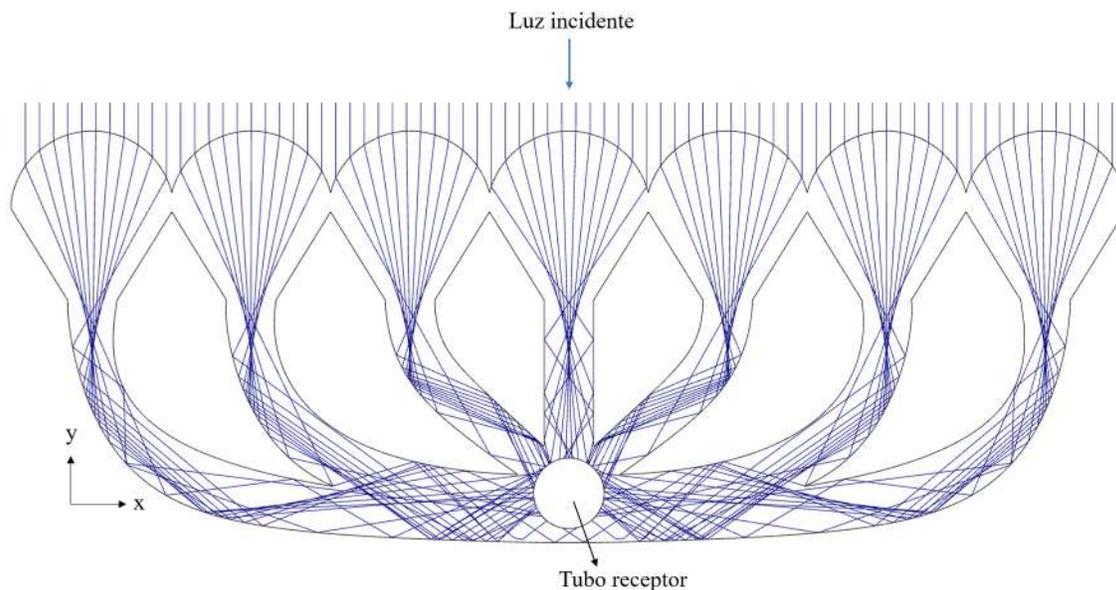


Figura 5.3: Traçado de raios para o sistema de 7 lentes 2-D.

## 5.2 Térmico

A partir do estado arte sobre concentradores solares, foram identificados novas propostas de modelos concentradores que utilizam espelho, lentes ou os dois para captação da luz solar. Esses novos modelos contam com sistema de rastreamento solar e possuem foco pontual ou linear. Eles utilizam espelhos primários e secundários que podem ser planos ou curvos, lentes Fresnel, espelhos circulares. Esses instrumentos são feitos de materiais de alta refletividade e baixa absorção e refletividade no caso de lentes.

Os novos design de coletores não foram desenvolvido em estrutura de fácil implementação em residencias, como em telhados por exemplo. Dessa forma precisam de suportes e em muitos casos espaço próprio para eles.

O processo de otimização está bem presente durante o desenvolvimento desses novos designs de coletores principalmente na parte óptica e receptores solares na tentativa de reduzi perdas ópticas e térmica. Esses modelos foram desenvolvido especificamente para produção de energia térmica.

A Tabela 5.2 mostra a temperatura máxima e eficiência térmica de alguns modelos de concentradores solares. Devido a a alta sensibilidade desses dispositivos ao ângulo de

incidência solar faz-se necessário o uso de sistema de rastreamento solar, pois a redução na eficiência óptica afeta o desempenho térmico do concentrador solar reduzindo-o.

Os resultados desse estudo são comparados com os obtidos em diferentes trabalhos. Dessa forma torna-se evidente que eficiência térmica do concentrador solar de lentes cilíndrica é satisfatória. Além disso, ele apresenta uma a variação de temperatura entre 298 K a 373 K em um pequeno intervalo de tempo que é em torno de 1.8 minutos. Mostrando assim grande potencial para produção de energia térmica e aplicações na área do concentradores solares.

Tabela 5.2: Concentradores solares em aplicação termosolar

Referência	Eficiência óptica e razão de concentração de diferentes concentradores		
	Modelo de concentrador	Temperatura Máxima	Eficiência Térmica
[11]	Concentrador Solar Fresnel anular (AFSC)	956,0 °C	88,0%
[12]	Concentrador Solar Fresnel Anular com Lente Fresnel (AFSC)	567,0 °C	88,5%
[18]	Concentrador Solar de Prato Triplo	75 °C	34%
[48]	Coletor Solar de Calha Parabólica (PTSC)	–	80%
[13]	Concentrador solar Lente Fresnel Solar de Foco Fixo	–	32%
Autor	Concentrador Solar de Lentes Cilíndricas e Guias de Ondas	–	73,6%

O custo inicial desses dispositivos é um desafio a ser superado para a comercialização efetiva desses coletores. Dessa forma o modelo proposto nesse estudo é feito em material baixo custo e implementável em telhados residenciais.

A validação do processo de simulação ocorreu através da reprodução dos resultados de eficiência óptica e térmica de um Coletor Solar de Absorção Direta (DASC) usando água como fluido de trabalho. Esse dispositivo apresenta eficiência óptica de 95,3% e eficiência

térmica de 15,8% [49]. Onde esse dispositivo apresenta os seguintes parâmetros área superficial superior de  $1 \text{ m}^2$ , a velocidade do fluido igual  $0.002 \text{ m/s}$ , intensidade inicial de  $1000 \text{ W/m}^2$ , a potência inicial de  $1000 \text{ W}$ , área de secção transversal igual  $0.001 \text{ m}^2$ , o fluido de trabalho é a água, temperatura inicial de  $25 \text{ C}$  igual a temperatura ambiente, espessura do coletor  $1 \text{ cm}$  e coeficiente de perda de perda calor igual  $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ . A perda de calor ocorre somente na parte superior do coletor por condução e convecção, pois a face inferior do coletor é considerada adiabática [50].

Essa etapa do estudo foi importante para se verificar que as conexões entre os módulos, de óptica de raios, absorção de radiação, e transferência de calor, do COMSOL, os parâmetros iniciais e as variáveis estavam definidas corretamente. Esse processo foi realizado para o DASC em duas e três, mostrado na Fig. 5.4, dimensões e os resultados concordaram satisfatoriamente [50]. Todo o processo de simulação para o sistema de 7 lentes cilíndricas foi feito integralmente no software COMSOL Multiphysics 5.5.

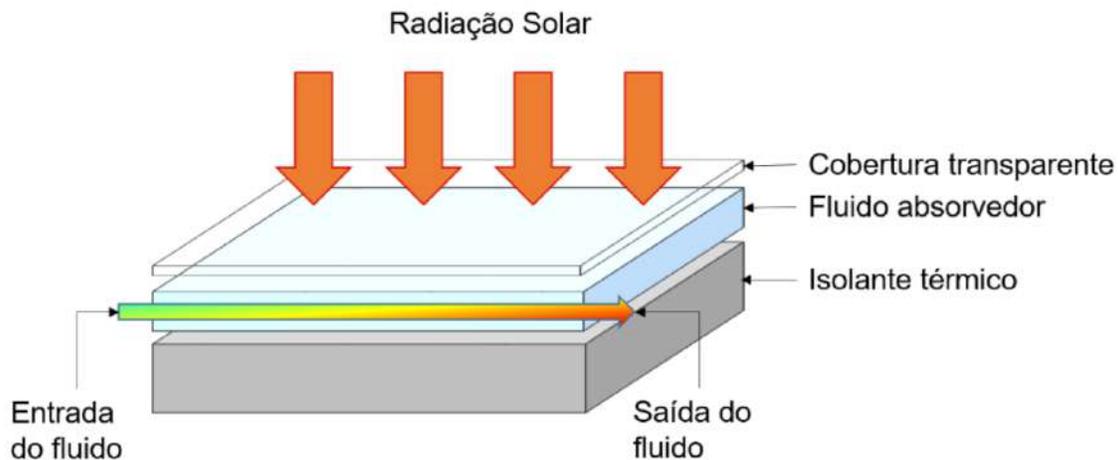


Figura 5.4: Coletor Solar de Absorção Direta (DASC) em três dimensões. Fonte: [50] .

A Fig. 5.5 mostra a variação de temperatura da água em função do tempo para o sistema de 3.5 lentes cilíndricas e para o DASC. Esse resultado foi obtido para o fluido de trabalho desconsiderando escoamento, perda térmica e temperatura inicial igual a ambiente de  $298\text{K}$  equivalente  $25^\circ\text{C}$  para o DASC e o concentrador solar. Devido a alta quantidade de energia no tubo receptor para o concentrador ele aquece rapidamente a água e atinge temperatura muito mais elevada que o DASC.

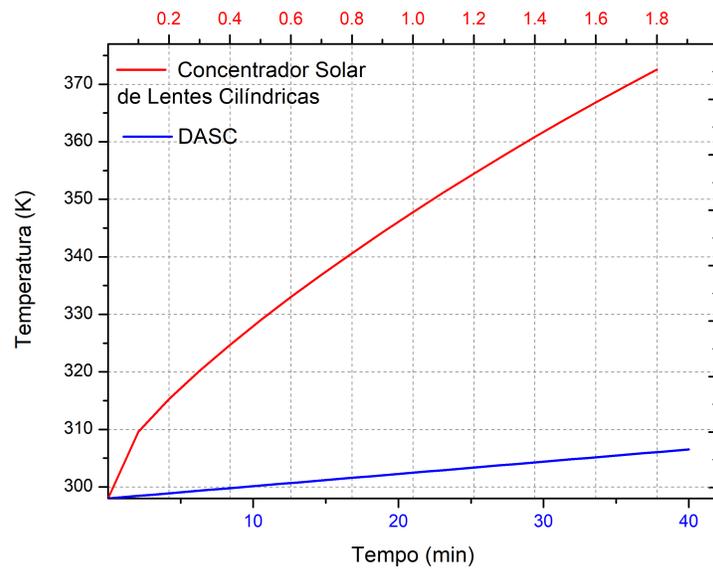


Figura 5.5: Temperatura em função do tempo para o concentrador solar de 3.5 lentes cilíndricas e para o Coletor Solar de Absorção Direta (DASC).

Esses resultados foram obtidos tanto para o sistemas de 3.5 lentes esquerdo quanto para o direito. Para a construção deste gráfico o tempo de estudo na simulação foi 1.8 minutos para o concentrador. Isso porque após esse período de tempo toda a água existentes no interior do tubo receptor passou para o estado gasoso. Enquanto que para o DASC o tempo de estudo foi 40 minutos, tempo necessário para a temperatura do fluido de trabalho alcançar 308K, ou seja, 35°C.

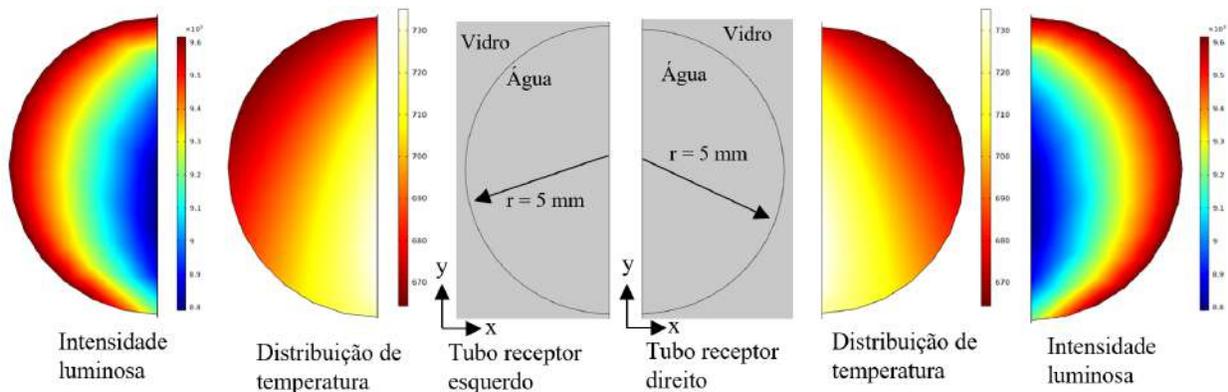


Figura 5.6: Tubo receptor, temperatura e intensidade luminosa para as partes simétrica da geometria do concentrador solar de 7 lentes cilíndricas.

A Fig. 5.6 apresenta a uma das extremidades do tubo receptor, a distribuição de

temperatura para o tempo de simulação igual a 40 minutos e a intensidade luminosa no interior do mesmo. Desse forma é notório que os resultados para o lado esquerdo e direito do tubo receptor mostram-se aproximadamente iguais.

O processo de absorção da luz pela água é descrita pela lei de Lambert-Beer. Ela descreve a forma como a intensidade luminosa diminui a medida que a luz penetra na água. Como consequência dessa redução na intensidade da luz tem-se o aumento de temperatura do fluido devido a parcela de energia luminosa que foi absorvida por ele.

Partindo dessa ideia ainda na Fig. 5.6 é possível perceber como a intensidade da luz é reduzida a medida que adentra o tubo. Essa perda na intensidade luminosa é o que resulta no aquecimento do fluido de trabalho. Ao comparar as imagens da intensidade e distribuição de temperatura, percebe-se que na região onde a intensidade da luz aparece menor, para o mesmo lado, do tubo a temperatura maior nessa mesma região. Mostrando assim que o deficit na intensidade luminosa corresponde ao acréscimo no saldo de energia térmica.

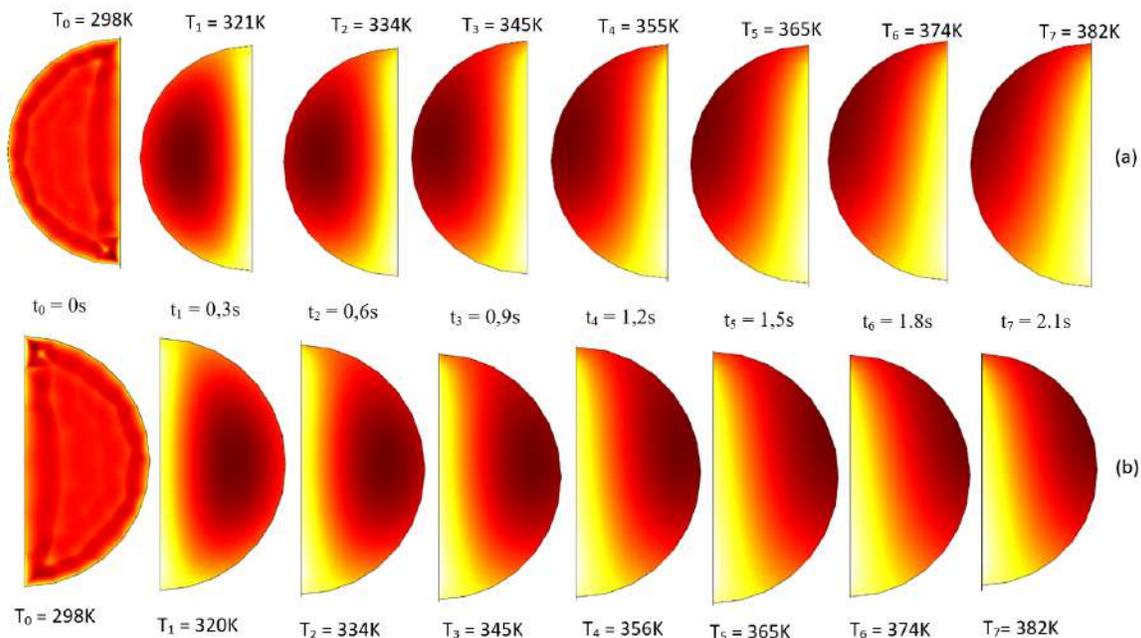


Figura 5.7: Distribuição de temperatura para os sistemas simétricos de 3.5 lentes esquerdo (a) e direito (b) em diferentes instantes, do intervalo, de tempo que a água leva para atingi a temperatura de 373 K.

As temperaturas nos dois lados do tubo receptor e o intervalo de tempo que a água leva para atingir 373 K são apresentados na Fig. 5.7. Esse valor de temperatura na escala Celsius corresponde a 100 °C, ou seja, temperatura de ebulição da água. O intervalo de tempo em que ocorreu essa variação de temperatura foi 1.8 minutos para ambos os lados.

---

---

# CAPÍTULO 6

---

## CONCLUSÃO

Neste estudo foi realizado a simulação e otimização de um novo modelo concentrador solar constituído de 7 lentes cilíndricas e 7 guias de ondas. A estrutura do concentrador foi construída toda em vidro na simulação, por meio do software COMSOL Multiphysics 5.5, e utiliza água como fluido de trabalho.

O processo de otimização elevou a eficiência óptica do dispositivo em 15% através de simulação no COMSOL Multiphysics com programação em MATLAB utilizando Métodos de Elementos Finitos, Óptica de Raios e Algoritmo Genético.

O concentrador solar proposto apresenta uma eficiência óptica máxima de 94% para luz solar em incidência normal ao concentrador. A razão de concentração do coletor é igual a 19 em simulação. O dispositivo focaliza a luz em uma linha na qual encontra-se o tubo receptor. Os resultados mostraram que o concentrador possui altos valores de eficiência óptica para uma ampla faixa de ângulos o que possibilita a utilização desse dispositivo sem a necessidade de sistema de rastreamento solar em regiões equatoriais.

Cada uma das partes simétricas do concentrador solar de 7 lentes e 7 guias de ondas, composto por 3,5 lentes e guias de ondas cada, apresentam eficiência térmica de 73,6% e apresentam variação de temperatura de entre 298K e 373K no intervalo de tempo de 1,8

minutos. Esses valores de temperatura na escala Celsius correspondem a 25°C e 100°C.

O formato do concentrador torna-o funcional em telhados residenciais. Mediante o desempenho do concentrador, percebe-se o seu potencial para diversas aplicações como térmica, fotovoltaica, dessalinização e iluminação de ambiente com luz natural.

Em comparação com os modelos de coletores solares presentes na literatura o modelo proposto apresenta vantagens como alta eficiência óptica e térmica, é passível de implementação em residências, não necessita de sistema de rastreamento solar, alto valor de razão de concentração, focaliza a luz em linha e é feito em estrutura única para evitar perdas ópticas.

Resultados parciais deste estudo serviram de base para o artigo “Analysis of 3-D waveguides in a cylindrical lens solar concentrator” publicado e apresentados na 2022 SBFoton International Optics and Photonics Conference.

## 6.1 Sugestões para Estudos Futuros

Foram observadas as seguintes oportunidades de continuidade do trabalho descrito nesta dissertação:

- Realização de estudo experimental a partir da geometria proposta em simulação;
- Realizar o estudo em 3 dimensões em simulação e testar outros fluidos de trabalho em substituição a água em virtude das elevadas temperatura alcançada pela dispositivo em simulação;
- Analisar a geometria utilizando lentes de fresnel em substituição as lentes cilíndricas reduzindo a quantidade de material na construção da geometria;
- Explorar outras geometrias para o tubo receptor buscando avaliar maior desempenho térmico para os mesmos.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FR Martins, EB Pereira, SAB Silva, SL Abreu, and Sergio Colle. Solar energy scenarios in brazil, part one: Resource assessment. *Energy Policy*, 36(8):2853–2864, 2008.
- [2] Agmar Ferreira, Sheila S Kunh, Kátia C Fagnani, Tiago A De Souza, Camila Tonezer, Geocris Rodrigues Dos Santos, and Carlos H Coimbra-Araújo. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81:181–191, 2018.
- [3] Anderson Spacek, M. Santana, J.M. Mota, L.D. Biléssimo, Oswaldo Hideo Ando Junior, G.P. Freitas, and Tiago Pereira. Estimated environments lighting capacity through sunlight. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, pages 458–462, 05 2016.
- [4] Vinod Kumar, RL Shrivastava, and SP Untawale. Solar heating for industrial process heat: step towards eco-friendly and sustainable technology. *Solar Energy*, 20:22, 2013.
- [5] D Yogi Goswami. *Principles of solar engineering*. CRC Press, 3rd edition, 2015.
- [6] Anderson Diogo Spacek, João Mota Neto, Luciano Dagostin Biléssimo, Oswaldo Hideo Ando Junior, Marcus Vinícius Ferreira de Santana, and Celia De Fraga Malfatti. Proposal of the tubular daylight system using acrylonitrile butadiene styrene (abs) metalized with aluminum for reflective tube structure. *Energies*, 11(1):199, 2018.

- [7] Fernando Ramos Martins, Enio Bueno Pereira, Samuel Luna de Abreu, and Sergio Colle. Brazilian atlas for solar energy resource: Swera results. In *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I–Vol. V)*, pages 2651–2655. Springer, 2008.
- [8] Ehsanul Kabir, Pawan Kumar, Sandeep Kumar, Adedeji A Adelodun, and Ki-Hyun Kim. Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82:894–900, 2018.
- [9] Priscila Gonçalves Vasconcelos Sampaio and Mario Orestes Aguirre González. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74:590–601, 2017.
- [10] Philipp Hahn, L. T. Pereira, Jan Knaack, and Bärbel Epp. Energia termossolar para a indústria: Brasil, 2018. Last accessed 07 july 2022.
- [11] Kai Liang, Kaili Xue, Heng Zhang, Haiping Chen, and Jianxiong Ni. Design and performance analysis of an annular fresnel solar concentrator. *Energy*, 210:118594, 2020.
- [12] Kai Liang, Heng Zhang, Haiping Chen, Dan Gao, and Yang Liu. Design and test of an annular fresnel solar concentrator to obtain a high-concentration solar energy flux. *Energy*, 214:118947, 2021.
- [13] R Manikumar and A Valan Arasu. an analytical and experimental study of the linear fresnel reflector solar concentrator system. *Distributed Generation & Alternative Energy Journal*, 29(2):52–80, 2014.
- [14] Hai Wang, Jin Huang, Mengjie Song, Yanxin Hu, Yunfeng Wang, and Zijian Lu. Simulation and experimental study on the optical performance of a fixed-focus fresnel lens solar concentrator using polar-axis tracking. *Energies*, 11(4):887, 2018.
- [15] An Chi Wei, Shih Chieh Lo, Ju-Yi Lee, and HongYih Yeh. Costeffective light-mixing module for solarlighting system appended with auxiliary rgbw lightemitting diodes. *Journal of Solar Energy Engineering*, 139(6), 2017.

- [16] Sandra FH Correia, Patrícia P Lima, Paulo S André, Maria Rute Sá Ferreira, and Luís António Dias Carlos. High-efficiency luminescent solar concentrators for flexible waveguiding photovoltaics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 138:51–57, 2015.
- [17] R Huang, Y Liu, and CK Madsen. First demonstration of a novel 2d-waveguiding solar concentrator. In *High and Low Concentrator Systems for Solar Energy Applications IX*, volume 9175, pages 136–142. SPIE, 2014.
- [18] Evangelos Bellos, Sasa R Pavlovic, Darko Vasiljević, Velimir P Stefanovic, and Christos Tzivanidis. Experimental and numerical investigation of a triple-dish solar concentrator: a thermal and exergy study. *International Journal of Exergy*, 26(4):481–501, 2018.
- [19] Mokhtar Ghazouani, Mohsine Bouya, and Mohammed Benaissa. A new methodology to select the thermal solar collectors by localizations and applications. In *2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, pages 1–5. IEEE, 2015.
- [20] Vikrant Kamboj, Himanshu Agrawal, Anish Malan, and Avadhesh Yadav. Thermal performance of the steam boiler based on scheffler solar concentrator for domestic application: Experimental investigation. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 19(5):521–531, 2021.
- [21] Muhyiddine Jradi and Saffa Riffat. Medium temperature concentrators for solar thermal applications. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 9(3):214–224, 2014.
- [22] Mokhtar Ghodbane, Djamel Benmenine, Abderrahmane Khechekhouche, and Boussad Boumeddane. Brief on solar concentrators: Differences and applications. *Instrumentation, Mesures, Métrologies*, 19(5), 2020.
- [23] Himanshu Agrawal and Avadhesh Yadav. Economic analysis of solar thermal system for melting of ice at high altitude regions using scheffler solar concentrator. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(3):497–506, 2021.

- [24] A Ahmadi, MA Ehyaei, A Doustgani, Mamdouh El Haj Assad, F Esmailion, A Hmida, DH Jamali, R Kumar, ZX Li, and A Razmjoo. Recent progress in thermal and optical enhancement of low temperature solar collector. *Energy Systems*, pages 1–40, 2021.
- [25] Mohammad Akrami, Husain Alsari, Akbar A Javadi, Mahdieh Dibaj, Raziye Farmani, Hassan ES Fath, Alaa H Salah, and Abdelazim Negm. Analysing the material suitability and concentration ratio of a solar-powered parabolic trough collector (ptc) using computational fluid dynamics. *Energies*, 13(20):5479, 2020.
- [26] Lin Chen, Jia-Xiang Chen, and Xin-Rong Zhang. Numerical simulation on the optical and thermal performance of a modified integrated compound parabolic solar concentrator. *International Journal of Energy Research*, 39(13):1843–1857, 2015.
- [27] Stefania Guarino, Alessandro Buscemi, Giuseppina Ciulla, Marina Bonomolo, and Valerio Lo Brano. A dish-stirling solar concentrator coupled to a seasonal thermal energy storage system in the southern mediterranean basin: A cogenerative layout hypothesis. *Energy Conversion and Management*, 222:113228, 2020.
- [28] F Chen, M Li, P Zhang, and X Luo. Thermal performance of a novel linear cavity absorber for parabolic trough solar concentrator. *Energy Conversion and Management*, 90:292–299, 2015.
- [29] A Farouk Kothdiwala, PC Eames, and B Norton. Optical performance of an asymmetric inverted absorber compound parabolic concentrating solar collector. *Renewable energy*, 9(1-4):576–579, 1996.
- [30] John A Duffie and William A Beckman. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons, 2013.
- [31] Carlos Ramírez, Noel León, Héctor García, and Humberto Aguayo. Optical design of two-axes parabolic trough collector and two-section fresnel lens for line-to-spot solar concentration. *Optics Express*, 23(11):A480–A492, 2015.
- [32] Eugene Hecht. *Optics, global edition*. Pearson Education UK, 2016.

- [33] Jeff Hecht. *Understanding fiber optics*. Jeff Hecht, 2015.
- [34] Sandra FH Correia, Patrícia P Lima, Edison Pecoraro, Sidney JL Ribeiro, Paulo S André, Rute AS Ferreira, and Luís D Carlos. Scale up the collection area of luminescent solar concentrators towards metre-length flexible waveguiding photovoltaics. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 24(9):1178–1193, 2016.
- [35] Hugh D. Young and Roger A. Freedman. *Física 4 IV: ótica e física moderna*. revisão técnica Adir Moysés Luiz. - 14. ed. - São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.
- [36] Paul Allen Tipler and Gene Mosca. *Física para cientistas e engenheiros. Vol. 2: electricidade e magnetismo, óptica*. 6. ed. Grupo Gen-LTC, 2000.
- [37] Bin Yang, Jun Zhao, Wenbin Yao, Qiang Zhu, and Hang Qu. Feasibility and potential of parabolic trough solar thermal power plants in tibet of china. In *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pages 1–4. IEEE, 2010.
- [38] SN Sivanandam and SN Deepa. Genetic algorithms. In *Introduction to genetic algorithms*, pages 15–37. Springer, 2008.
- [39] Stephanie Forrest. Genetic algorithms. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 28(1):77–80, 1996.
- [40] Achille Messac. *Optimization in practice with MATLAB®: for engineering students and professionals*. Cambridge University Press, 2015.
- [41] COMSOL Multiphysics Version COMSOL. 4.4: User’s guide and reference manual. *COMSOL, Burlington, Massachusetts, United States*, 2014.
- [42] COMSOL Multiphysics. Heat transfer module user’s guide. *COMSOL version, 4*, 2014.
- [43] C Julian Chen. *Physics of solar energy*. John Wiley & Sons, 2011.
- [44] Frank P Incropera, David P DeWitt, Theodore L Bergman, Adrienne S Lavine, et al. *Fundamentals of heat and mass transfer*, volume 6. Wiley New York, 1996.

- [45] Chun-Hsien Chou, Jui-Kang Chuang, and Fang-Chung Chen. High-performance flexible waveguiding photovoltaics. *Scientific reports*, 3(1):1–8, 2013.
- [46] Céline Michel, Pascal Blain, Lionel Clermont, Fabian Languy, Cédric Lenaerts, Karl Fleury-Frenette, Marc Décultot, Serge Habraken, Denis Vandormael, Rudi Cloots, et al. Waveguide solar concentrator design with spectrally separated light. *Solar Energy*, 157:1005–1016, 2017.
- [47] Chun-Hsien Chou, Min-Hung Hsu, and Fung-Chung Chen. Flexible luminescent waveguiding photovoltaics exhibiting strong scattering effects from the dye aggregation. *Nano Energy*, 15:729–736, 2015.
- [48] Hamzeh Jamali. Investigation and review of mirrors reflectance in parabolic trough solar collectors (ptscs). *Energy Reports*, 5:145–158, 2019.
- [49] Sajid Farooq, Caio VP Vital, Luis A Gómez-Malagón, Renato E de Araujo, and Diego Rativa. Thermo-optical performance of iron-doped gold nanoshells-based nanofluid on direct absorption solar collectors. *Solar Energy*, 208:1181–1188, 2020.
- [50] Caio Vinicius Pinheiro Vital, Diego Rativa, Luis Arturo Gómez-Malagón, and Renato Evangelista de Araujo. Avaliação do uso de nanofluido de nitreto de titânio em coletor solar de absorção direta. In *Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*, pages 1–7, 2022.
- [51] Ali Sulaiman Alsagri. Energy performance enhancement of solar thermal power plants by solar parabolic trough collectors and evacuated tube collectors-based preheating units. *International Journal of Energy Research*, 44(8):6828–6842, 2020.
- [52] LA Andrade, MAS Barrozo, and LGM Vieira. A study on dynamic heating in solar dish concentrators. *Renewable Energy*, 87:501–508, 2016.
- [53] Juan Pablo Núñez Bootello, Henry Price, Manuel Silva Pérez, and Manuel Doblare Castellano. Optical analysis of a two stage xx concentrator for parametric trough primary and tubular absorber with application in solar thermal energy trough power plants. *Journal of Solar Energy Engineering*, 138(4), 2016.

- [54] Matteo Bortolato, Simone Dugaria, and Davide Del Col. Experimental study of a parabolic trough solar collector with flat bar-and-plate absorber during direct steam generation. *Energy*, 116:1039–1050, 2016.
- [55] TE Boukelia, MS Mecibah, and IE Meliche. Design, optimization and feasibility study of parabolic trough solar thermal power plant with integrated thermal energy storage and backup system for algerian conditions. In *3rd International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA)*, pages 1–5. IEEE, 2014.
- [56] Cuma Çetiner. Experimental and theoretical analyses of a double-cylindrical trough solar concentrator. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(11):4857–4863, 2020.
- [57] D Chemisana, J Barrau, JI Rosell, B Abdel-Mesih, M Souliotis, and F Badia. Optical performance of solar reflective concentrators: a simple method for optical assessment. *Renewable energy*, 57:120–129, 2013.
- [58] Nouredine El Moussaoui, Sofian Talbi, Ilyas Atmane, Khalil Kassmi, Klemens Schwarzer, Hamid Chayeb, and Najib Bachiri. Feasibility of a new design of a parabolic trough solar thermal cooker (pstc). *Solar Energy*, 201:866–871, 2020.
- [59] Naum Fraidenraich, Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho, Olga C Vilela, and Jeffrey M Gordon. Exact analytic flux distributions for two-dimensional solar concentrators. *Applied Optics*, 52(19):4596–4600, 2013.
- [60] Shiva Gorjian, Hossein Ebadi, Francesco Calise, Ashish Shukla, and Carlo Ingraio. A review on recent advancements in performance enhancement techniques for low-temperature solar collectors. *Energy Conversion and Management*, 222:113246, 2020.
- [61] Hamed Hoseinzadeh, Alibakhsh Kasaeian, and Mohammad Behshad Shafii. Geometric optimization of parabolic trough solar collector based on the local concentration ratio using the monte carlo method. *Energy Conversion and Management*, 2018.
- [62] Chuan Jiang, Lei Yu, Song Yang, Keke Li, Jun Wang, Peter D Lund, and Yaoming

- Zhang. A review of the compound parabolic concentrator (cpc) with a tubular absorber. *Energies*, 13(3):695, 2020.
- [63] Hongguang Jin, Jun Sui, Hui Hong, Zhifeng Wang, Danxing Zheng, and Zhi Hou. Prototype of middle-temperature solar receiver/reactor with parabolic trough concentrator. 2007.
- [64] Alibakhsh Kasaeian, Amir Kouravand, Mohammad Amin Vaziri Rad, Siavash Maniee, and Fathollah Pourfayaz. Cavity receivers in solar dish collectors: A geometric overview. *Renewable Energy*, 169:53–79, 2021.
- [65] Yanhua Lai, Gu Song, Mingxin Lu, Zhen Dong, Shuping Che, and Chunyuan Ma. Thermal performance analysis of linear fresnel reflector concentrator with a compound parabolic cavity absorber. In *2011 International Conference on Materials for Renewable Energy & Environment*, volume 1, pages 168–172. IEEE, 2011.
- [66] Longlong Li, Huairui Li, Qian Xu, and Weidong Huang. Performance analysis of azimuth tracking fixed mirror solar concentrator. *Renewable Energy*, 75:722–732, 2015.
- [67] NK Mandal and T Mandal. Analysis of a steam-generating system using a linear solar concentrator. *Energy*, 19(9):999–1003, 1994.
- [68] R Manikumar, A Valan Arasu, and S Jayaraj. Numerical simulation of a trapezoidal cavity absorber in the linear fresnel reflector solar concentrator system. *International Journal of Green Energy*, 11(4):344–363, 2014.
- [69] R Manikumar and A Valan Arasu. Heat loss characteristics study of a trapezoidal cavity absorber with and without plate for a linear fresnel reflector solar concentrator system. *Renewable energy*, 63:98–108, 2014.
- [70] R. Manikumar, Palanichamy R., and A. Arasu. Heat transfer analysis of an elevated linear absorber with trapezoidal cavity in the linear fresnel reflector solar concentrator system. *Journal of Thermal Science*, 24:90–98, 02 2015.

- [71] Qianjun Mao, Yong Shuai, and Yuan Yuan. Study on radiation flux of the receiver with a parabolic solar concentrator system. *Energy Conversion and Management*, 84:1–6, 2014.
- [72] MJ Montes, A Rovira, M Muñoz, and JM Martínez-Val. Performance analysis of an integrated solar combined cycle using direct steam generation in parabolic trough collectors. *Applied energy*, 88(9):3228–3238, 2011.
- [73] Ramon Pujol Nadal and Víctor Martínez Moll. Optical analysis of a curved-slats fixed-mirror solar concentrator by a forward ray-tracing procedure. *Applied optics*, 52(30):7389–7398, 2013.
- [74] N Nijegorodov, PK Jain, and KRS Devan. A non-tracking, cylindrical solar concentrator with circular cross-section: Theoretical and experimental analysis. *Renewable energy*, 6(1):1–9, 1995.
- [75] RY Nuwayhid, F Mrad, and RJRE Abu-Said. The realization of a simple solar tracking concentrator for university research applications. *Renewable Energy*, 24(2):207–222, 2001.
- [76] Reccab M Ochieng and Frederick N Onyango. A new type of solar concentrator employing a cone-cylinder combination. *International journal of global energy issues*, 31(2):169–182, 2009.
- [77] Rachel Oommen and S Jayaraman. Development and performance analysis of compound parabolic solar concentrators with reduced gap losses—oversized reflector. *Energy Conversion and Management*, 42(11):1379–1399, 2001.
- [78] Rachel Oommen and S Jayaraman. Development and performance analysis of compound parabolic solar concentrators with reduced gap losses—‘v’groove reflector. *Renewable Energy*, 27(2):259–275, 2002.
- [79] Hitesh Panchal, Kishor Kumar Sadasivuni, M Suresh, Mohammad Israr, and Shanmugan Sengottain. A concise review on solar still with parabolic trough collector. *International Journal of Ambient Energy*, pages 1–8, 2021.

- [80] Robert Pitz-Paal, Amr Amin, Marc Oliver Bettzuga, Philip Eames, Gilles Flamant, Fabrizio Fabrizi, John Holmes, Avi Kribus, Harry van der Laan, Cayetano Lopez, et al. Concentrating solar power in europe, the middle east and north africa: a review of development issues and potential to 2050. *Journal of solar energy engineering*, 134(2), 2012.
- [81] V Pranesh, R Velraj, S Christopher, and V Kumaresan. A 50 year review of basic and applied research in compound parabolic concentrating solar thermal collector for domestic and industrial applications. *Solar Energy*, 187:293–340, 2019.
- [82] RP Praveen, Mohammed Abdul Baseer, and Nampoothiri K Sankara. Design. performance analysis and optimization of a 100 mw concentrated solar power plant with thermal energy storage. In *2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTCT)*, pages 1–6. IEEE, 2018.
- [83] Ramon Pujol Nadal and Víctor Martínez Moll. Optical analysis of the fixed mirror solar concentrator by forward ray-tracing procedure. *Journal of solar energy engineering*, 134(3), 2012.
- [84] Ramon Pujol-Nadal and Víctor Martínez-Moll. Parametric analysis of the curved slats fixed mirror solar concentrator for medium temperature applications. *Energy conversion and management*, 78:676–683, 2014.
- [85] Ramon Pujol-Nadal, Víctor Martínez-Moll, and Andreu Moia-Pol. Parametric analysis of the fixed mirror solar concentrator for medium temperature applications. *Journal of solar energy engineering*, 136(1), 2014.
- [86] Hua Qin, Chengxin Lei, Hanfa Liu, Yong Wang, and Wenfeng Yuan. Optical design of an aspherical cylinder-type reflecting solar concentrator. *Energy*, 57:751–758, 2013.
- [87] Wattana Ratismith, Dilawer Ali, and John S Briggs. A non-tracking semi-circular trough solar concentrator. *International Journal of Energy Research*, 45(2):3185–3199, 2021.

- [88] KS Reddy, Anandhi Parthiban, and TK Mallick. Numerical modeling of heat losses in a line focusing solar compound parabolic concentrator with planar absorber. *Applied Thermal Engineering*, 181:115938, 2020.
- [89] KS Reddy, T Srihari Vikram, and Tapas K Mallick. Experimental performance investigations of an elliptical hyperbolic non-imaging solar concentrator with trapezoidal surface receiver for process heat applications. *Journal of Cleaner Production*, 192:735–750, 2018.
- [90] Naveed ur Rehman, Muhammad Uzair, and Muhammad Asif. Evaluating the solar flux distribution uniformity factor for parabolic trough collectors. *Renewable Energy*, 157:888–896, 2020.
- [91] Eduardo A Rinco´ n and Fidel A Osorio. A new troughlike nonimaging solar concentrator. *J. Sol. Energy Eng.*, 124(1):51–54, 2002.
- [92] José Ruelas, Daniel Saucedo, Juan Vargas, and Rafael García. Thermal and concentration performance for a wide range of available offset dish solar concentrators. *Applied Thermal Engineering*, 144:13–20, 2018.
- [93] Mohamed Sabry, Mouaaz Nahas, and Saud H Al-Lehyani. Simulation of a standalone, portable steam generator driven by a solar concentrator. *Energies*, 8(5):3867–3881, 2015.
- [94] Vishal Sardeshpande and Indu R Pillai. Effect of micro-level and macro-level factors on adoption potential of solar concentrators for medium temperature thermal applications. *Energy for Sustainable Development*, 16(2):216–223, 2012.
- [95] Panna Lal Singh, RM Sarviya, and JL Bhagoria. Heat loss study of trapezoidal cavity absorbers for linear solar concentrating collector. *Energy conversion and Management*, 51(2):329–337, 2010.
- [96] Panna Lal Singh, RM Sarviya, and JL Bhagoria. Thermal performance of linear fresnel reflecting solar concentrator with trapezoidal cavity absorbers. *Applied Energy*, 87(2):541–550, 2010.

- [97] Pushkaraj D Sonawane and VK Bupesh Raja. An overview of concentrated solar energy and its applications. *International Journal of Ambient Energy*, 39(8):898–903, 2018.
- [98] Jie Sun, Zhi Zhang, Li Wang, Zhenwen Zhang, and Jinjia Wei. Comprehensive review of line-focus concentrating solar thermal technologies: parabolic trough collector (ptc) vs linear fresnel reflector (lfr). *Journal of Thermal Science*, 29(5):1097–1124, 2020.
- [99] XY Tang, WW Yang, Y Yang, YH Jiao, and T Zhang. A design method for optimizing the secondary reflector of a parabolic trough solar concentrator to achieve uniform heat flux distribution. *Energy*, 229:120749, 2021.
- [100] V Thirunavukkarasu, M Sornanathan, and M Cheralathan. An experimental study on energy and exergy performance of a cavity receiver for solar parabolic dish concentrator. *International Journal of Exergy*, 23(2):129–148, 2017.
- [101] Fahim Ullah, Mansoor K Khattak, and Kang Min. Experimental investigation of the comparison of compound parabolic concentrator and ordinary heat pipe-type solar concentrator. *Energy & Environment*, 29(5):770–783, 2018.
- [102] Evert H du Marchie van Voorthuysen. The promising perspective of concentrating solar power (csp). In *2005 International Conference on Future Power Systems*, pages 7–pp. IEEE, 2005.
- [103] Lu Wang, Zhongxian Yuan, Yan Zhao, and Zhanquan Guo. Review on development of small point-focusing solar concentrators. *Journal of Thermal Science*, 28(5):929–947, 2019.
- [104] Qiang Wang, Jinfu Wang, and Runsheng Tang. Design and optical performance of compound parabolic solar concentrators with evacuated tube as receivers. *Energies*, 9(10):795, 2016.
- [105] Roland Winston and Weiya Zhang. Pushing concentration of stationary solar concentrators to the limit. *Optics express*, 18(101):A64–A72, 2010.

- [106] Hong-Yu Wu and Shu-Chun Chu. Ray-leakage-free sawtooth-shaped planar lightguide solar concentrators. *Optics express*, 21(17):20073–20089, 2013.
- [107] Xin-Lin Xia, Gui-Long Dai, and Yong Shuai. Experimental and numerical investigation on solar concentrating characteristics of a sixteen-dish concentrator. *International journal of hydrogen energy*, 37(24):18694–18703, 2012.
- [108] Xue Xiaodi, Zheng Hongfei, He Kaiyan, Chen Zhili, Tao Tao, and Xie Guo. Experimental study on a new solar boiling water system with holistic track solar funnel concentrator. *Energy*, 35(2):692–697, 2010.
- [109] B Zeroual and A Moumimi. Design of parabolic trough collector solar field for future solar thermal power plants in algeria. In *2012 2nd International Symposium On Environment Friendly Energies And Applications*, pages 168–172. IEEE, 2012.
- [110] Heng Zhang, Na Wang, Kai Liang, Yang Liu, and Haiping Chen. Research on the performance of solar aided power generation system based on annular fresnel solar concentrator. *Energies*, 14(6):1579, 2021.
- [111] Mingzhi Zhao, Zhizhang Liu, and Qingzhu Zhang. Feasibility analysis of constructing parabolic trough solar thermal power plant in inner mongolia of china. In *2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pages 1–4. IEEE, 2009.
- [112] Jie Zhu and Hulin Huang. Design and thermal performances of semi-parabolic linear fresnel reflector solar concentration collector. *Energy Conversion and Management*, 77:733–737, 2014.
- [113] DJ Carter. Developments in tubular daylight guidance systems. *Building Research & Information*, 32(3):220–234, 2004.
- [114] Francesco G Della Corte, Sandro Rao, Giuseppe Coppola, and Caterina Summonte. Electro-optical modulation at 1550 nm in an as-deposited hydrogenated amorphous silicon pin waveguiding device. *Optics express*, 19(4):2941–2951, 2011.
- [115] Eunice SP Leong, YJ Liu, CC Chum, B Wang, and JH Teng. Waveguiding effect in 2d metal–dielectric–metal grating structure. *Applied Physics A*, 107(1):127–132, 2012.

- [116] J Petržala, M Kocifaj, and L Kómar. Accurate tool for express optical efficiency analysis of cylindrical light-tubes with arbitrary aspect ratios. *Solar Energy*, 169:264–269, 2018.
- [117] MK Kuneva, SH Tonchev, M Sendova-Vasileva, D Dimova-Malinovska, and PA Atanasov. Ir-spectra of waveguides in linbo3 obtained by using different melts. *Sensors and Actuators A: Physical*, 99(1-2):154–159, 2002.
- [118] Bruno Malet-Damour, Dimitri Bigot, Stéphane Guichard, and Harry Boyer. Photometrical analysis of mirrored light pipe: From state-of-the-art on experimental results (1990–2019) to the proposition of new experimental observations in high solar potential climates. *Solar Energy*, 193:637–653, 2019.
- [119] Miroslav Kocifaj, František Kundracik, Stanislav Darula, and Richard Kittler. Theoretical solution for light transmission of a bended hollow light guide. *Solar Energy*, 84(8):1422–1432, 2010.
- [120] Nasim Tavakoli and Esther Alarcon-Llado. Combining 1d and 2d waveguiding in an ultrathin gaas nw/si tandem solar cell. *Optics express*, 27(12):A909–A923, 2019.
- [121] Biljana Obradovic and Barbara Szybinska Matusiak. Daylight autonomy improvement in buildings at high latitudes using horizontal light pipes and light-deflecting panels. *Solar Energy*, 208:493–514, 2020.
- [122] Jaromír Petržala. Simple analytic formula for the light-tube optical efficiency under overcast sky conditions. *Solar Energy*, 194:47–50, 2019.
- [123] Andrey V Semichaevsky, Harley T Johnson, Jongseung Yoon, Ralph G Nuzzo, Lanfang Li, and John Rogers. Theory for optimal design of waveguiding light concentrators in photovoltaic microcell arrays. *Applied optics*, 50(17):2799–2808, 2011.
- [124] Stanislav Darula, Richard Kittler, and Miroslav Kocifaj. Luminous effectiveness of tubular light-guides in tropics. *Applied energy*, 87(11):3460–3466, 2010.

---

---

# APÊNDICE A

---

## CONSTRUÇÃO DO COLETOR SOLAR BASEADO GUIAS DE ONDAS

### **Tutorial de Construção do Coletor Solar por meio do Software COMSOL Multiphysics 5.5**

Esse documento tem por objetivo descrever o passo a passo para a construção do coletor solar com guiamento de ondas e lentes plano-convexa 2-D, utilizando o COMSOL Multiphysics 5.5. Vale ressaltar que as instruções foram divididas em:

1. Construção de uma lente;
2. Construção da geometria do coletor;
3. Testagem da trajetória dos raios e Intensidade da luz;
4. Estudo da absorção solar;
5. Análise térmica;
6. Resultados e Gráficos de resultados.

É possível reproduzir o coletor seguindo as instruções a seguir.

## A.1 Construção de Uma Lente

Ao abrir o COMSOL, em file, clique "*Model Wizard*", conforme a Fig. A.1.

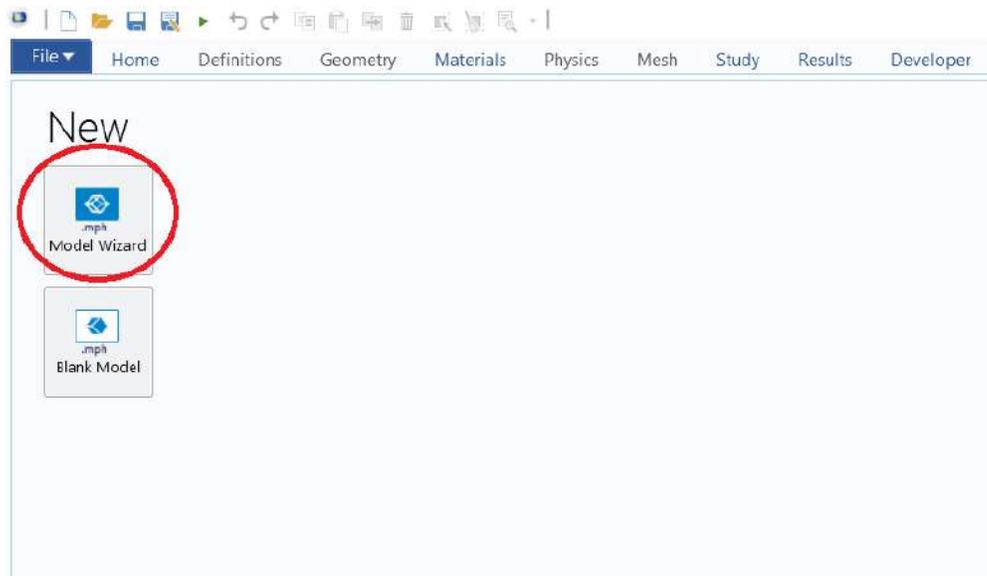


Figura A.1: Selecionando "*Model wizard*"

Em seguida, clique em "2-D", ver na Fig. A.2. A lente será construída em duas dimensões.

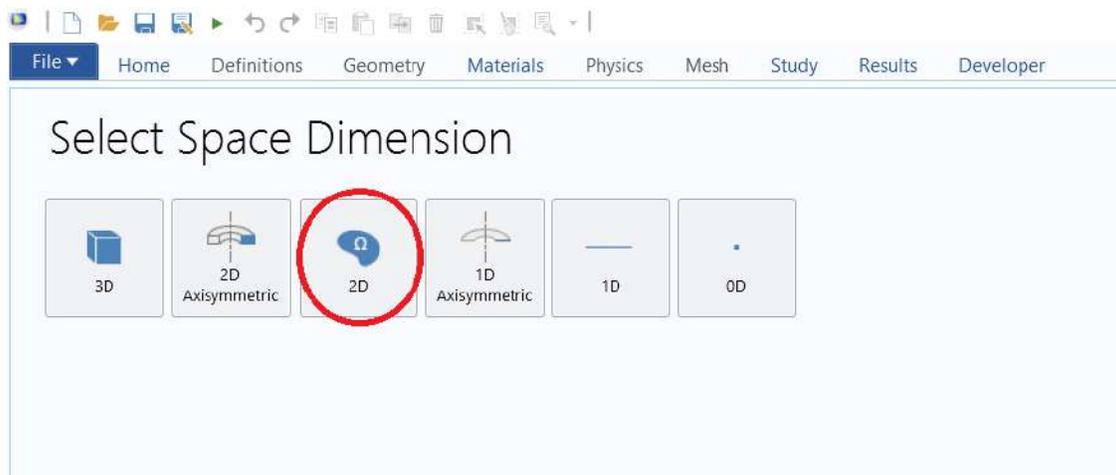


Figura A.2: Selecionando o espaço de dimensões "*2D*"

Em seguida em *"select Physics"*, na caixa de diálogo, pesquise por *"geometric optics (gop)"* e clique *"geometric optics (gop)"*, conforme a Fig. A.3.

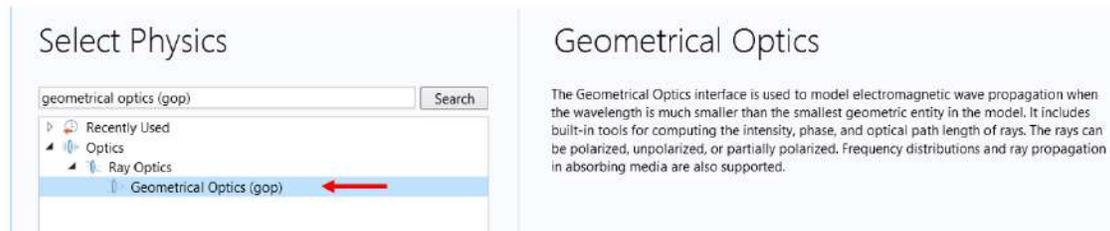


Figura A.3: Selecionando o módulo de óptica geométrica.

Na sequência clique em *"Add"*. Assim o módulo de análise geométrica óptica será carregado, como mostra a Fig. A.4.

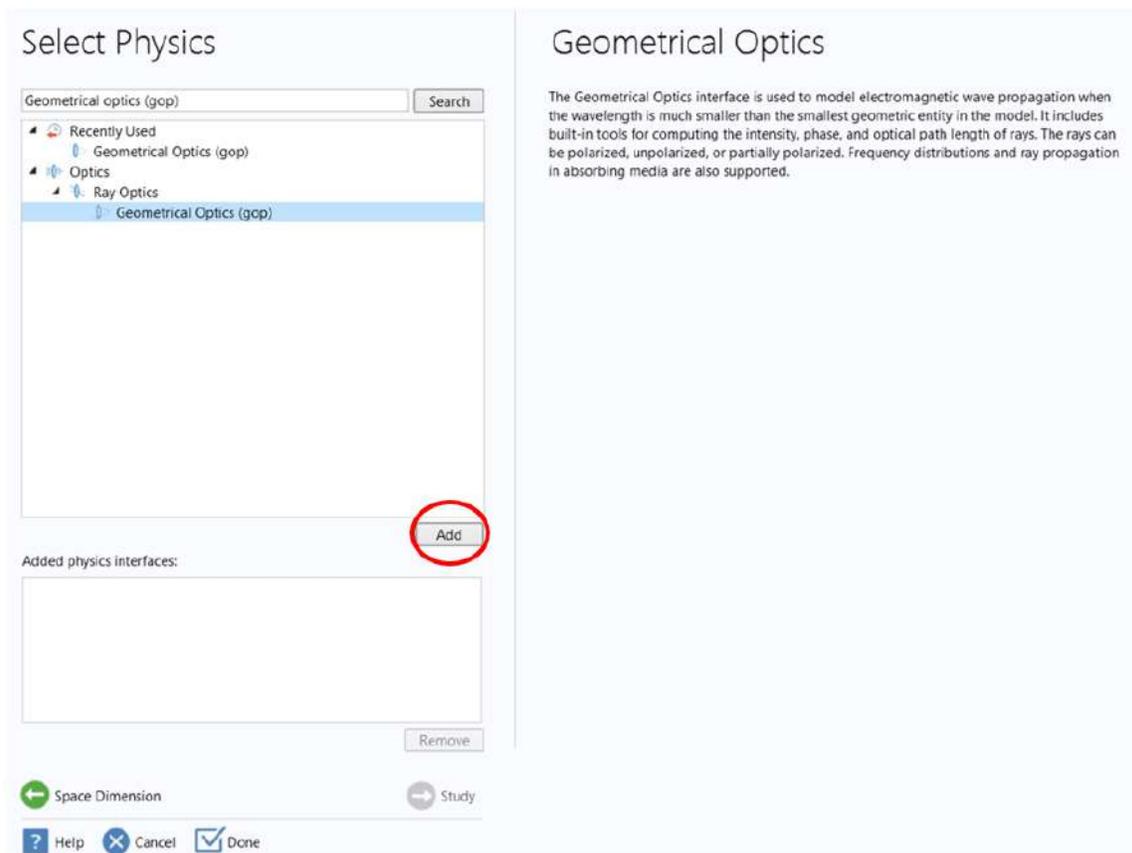


Figura A.4: Carregando o módulo de geometria óptica.

Posteriormente, ainda em *"select Physics"*, na caixa de diálogo pesquise por *"Heat Transfer with Radiative Beam in Absorbing Media"* e selecione *"Heat Transfer with Ra-*

*diative Beam in Absorbing Media"*, ver na Fig. A.5.



Figura A.5: Selecionando o módulo de transferência de calor e absorção solar.

Então, clique em *"Add"*, conforme a Fig. A.6. Assim é carregado o módulo de transferência de calor e absorção solar .

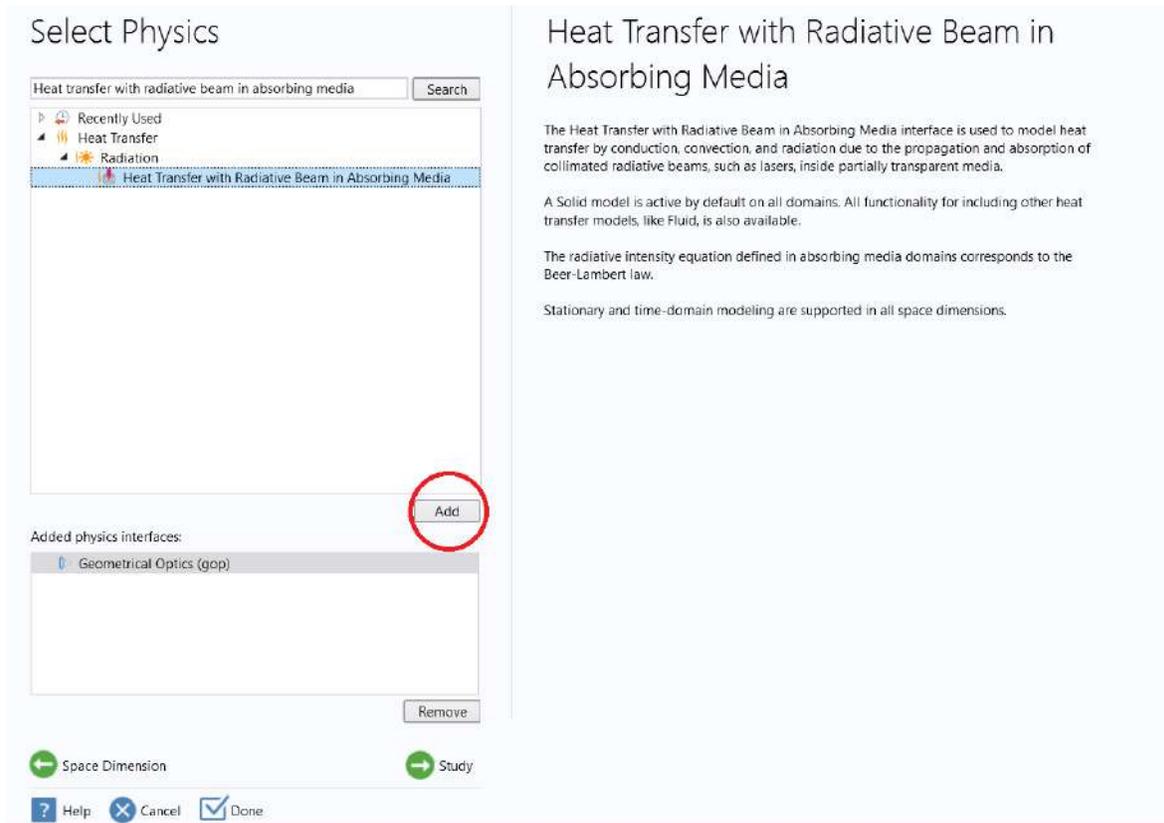


Figura A.6: Selecionando o módulo de transferência de calor e absorção solar.

Então, com os módulos adicionados clique em *"study"* conforme a Fig. A.7.

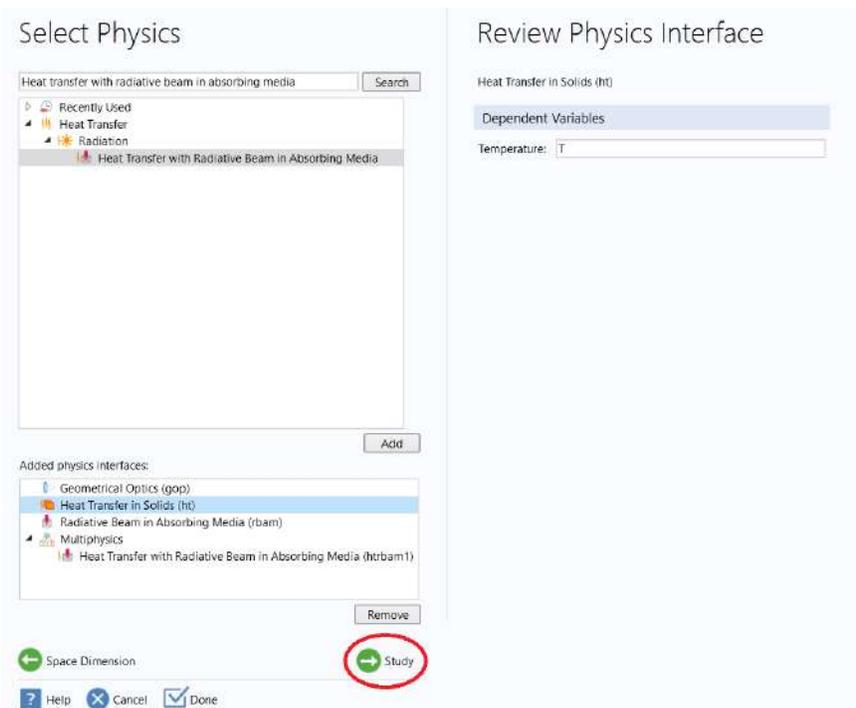


Figura A.7: Selecionando o estudo.

Ao aparecer a tela abaixo, em “*Select Study*”, clique em “*Ray Tracing*” e, em seguida, em “*Done*”, no final como indicado na Fig. A.8.

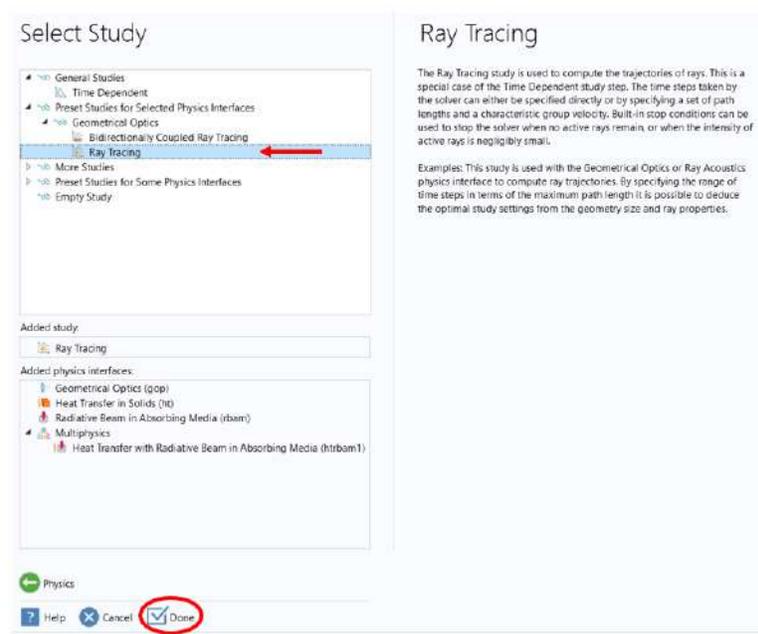


Figura A.8: Selecionando o módulo de traçado de raios.

O próximo passo é alterar a unidade de medida do modelo para milímetros. É possível fazer em “*Length unit*”, clicando no “**m**” e alterando de metros para “**mm**”, conforme a Fig A.9.

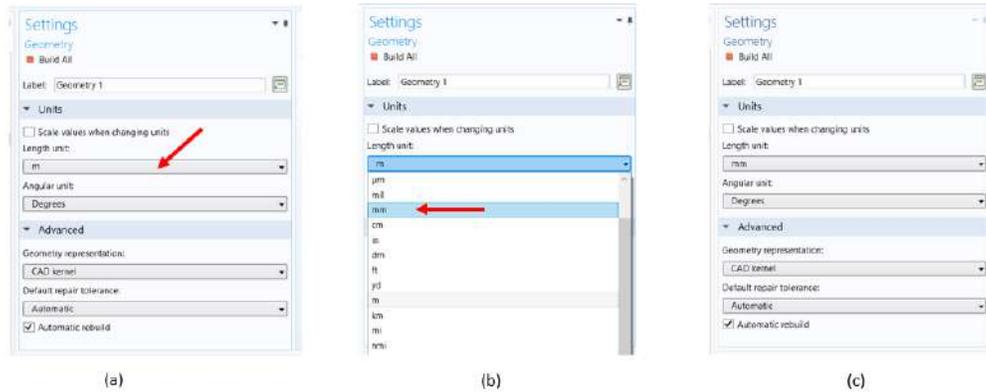


Figura A.9: Modificando a unidade de medida da geometria.

Em “*Model Builder*” >> “*Component 1 (comp1)*” clique em “*Geometry 1*”, selecione “*Parts*” e em seguida clique com o botão direito do mouse em “*Part Libraries.*”, mostrado na Fig. A.10.

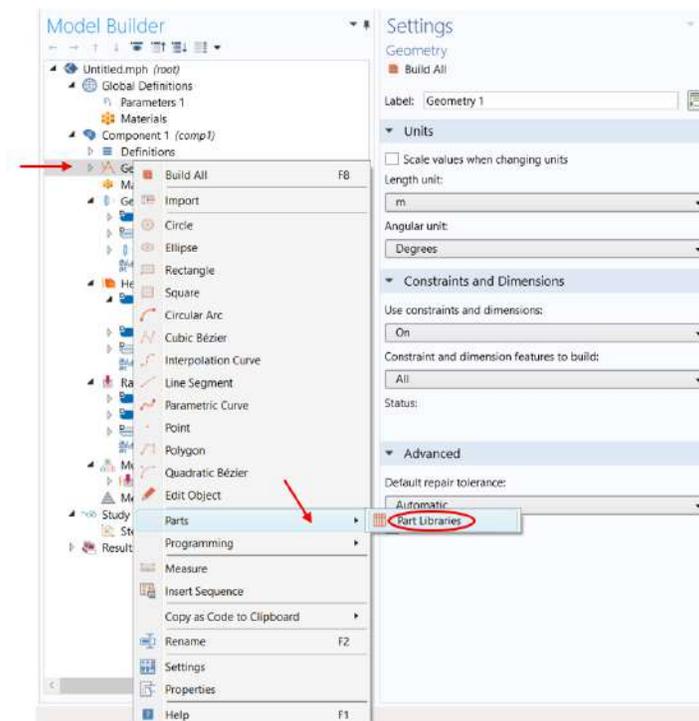


Figura A.10: Acessando a biblioteca de modelos/peças prontas.

Então aparecerá a tela, ver na Fig. A.11



Figura A.11: Área da biblioteca de modelos do Comsol.

Na sequência, em “Part libraries” clique em “Ray Optics Module” >> “2D” >> “Cylindrical Lenses” e selecione (cylindrical\_plano\_convex\_lens\_2d) e em seguida clique em “Add to Geometry”. Como mostra as Fig. A.12(a) e Fig. A.12(b), respectivamente.

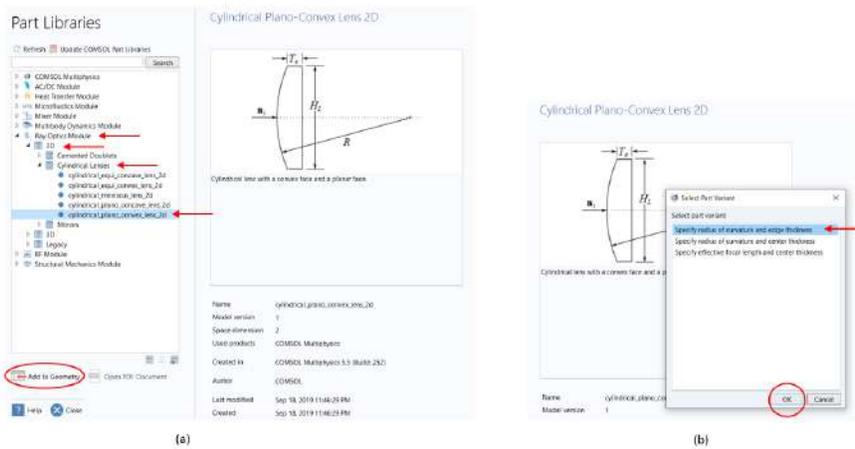


Figura A.12: Selecionando o modelo de lente de interesse (a) e a variante da peça (b).

Após carregada a geometria da lente, é necessário alterar os valores dos parâmetros da lente. Para esse projeto, foram usados: altura(HL) = 23 mm, raio(R) = 11.6 mm e largura da lente(Te) = 1 mm, ver na Fig. A.13.

Os parâmetros  $n_{ix}$  e  $n_{iy}$  indicam a direção em que os raios incidirão na lente. Como é preciso que a face cilíndrica da lente seja a de cima, e a plana a de baixo, faça  $n_{ix} = 0$  e

$n_{iy} = -1$ . Por fim, clique em “*Build Selected*”.

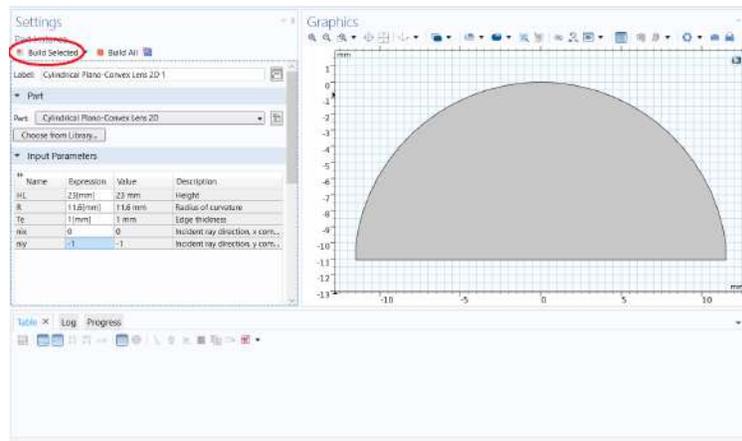


Figura A.13: Lente conforme os parametros utilizados.

## A.2 Construção da Geometria do Concentrador Solar

Inicia-se a construção da lentes clicando em “*geometry 1*”. Depois com o cursor sobre “*geometry 1*” clica-se com o botão direito do mouse. Então na nova janela que aparecer selecione e clique com o botão esquerdo em “*poligon*”, conforme mostra a Fig. A.14.

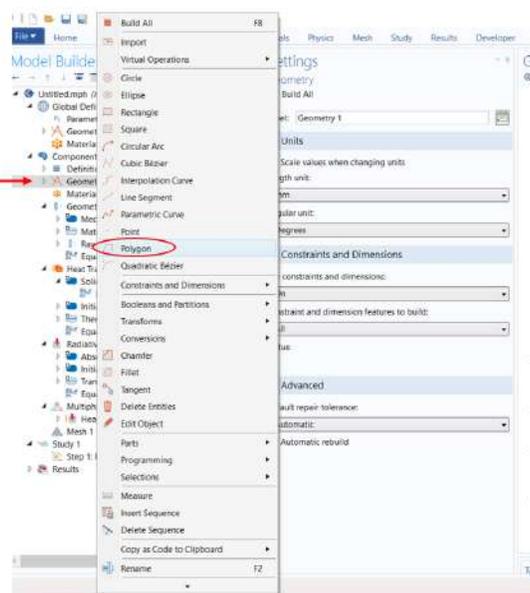


Figura A.14: Inserido polígono para construção de uma "base" para a lente.

Após a inclusão do polígono é preciso definir suas dimensões. Então em “Settings” >> “Polygon” >> “coordinates” na tabela insira os valores apresentados na Fig. A.15(a). Devem ser inseridos os valores exatamente como aparece na tabela da Fig. A.15(b), se não poderá ocorrer erro na construção da geometria. Após os valores inseridos para as dimensões em >> “Settings” >> “Polygon ” clique em “Build Selected”.

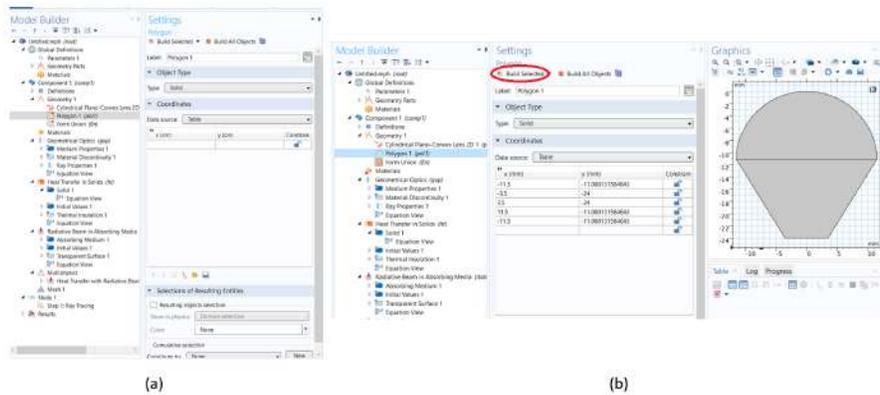


Figura A.15: Tabela de parâmetros do polígono (a), parâmetros e compilação do polígono(b).

Em seguida, é inserido mais outro polígono. Em “geometry 1” clicar com o botão esquerdo. Após, com o cursor sobre “geometry 1” clica-se com o botão direito do mouse. Então na nova janela que aparecer selecione e clique com o botão esquerdo em “polygon”, conforme a Fig. A.14(a). Esse procedimento deve ser repetido sempre que for preciso inserir um novo polígono. As dimensões desse polígono são mostradas na Fig. A.14(b). Após a inserções dos valores das dimensões do polígono em >> “Settings” >> “Polygon ” clique em “Build Selected”.

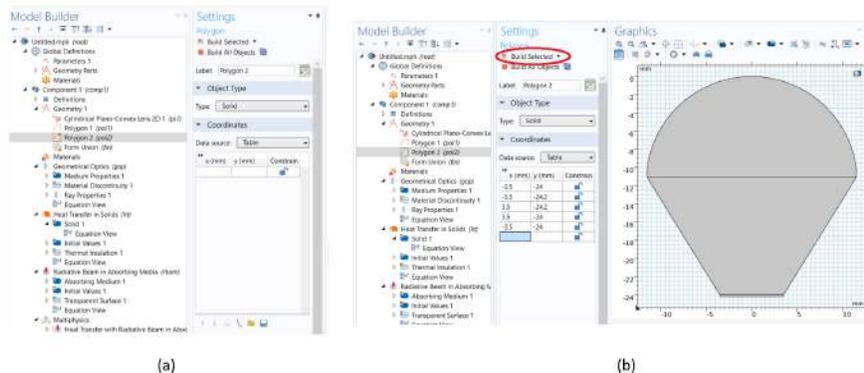


Figura A.16: Tabela de parâmetros do polígono (a), parâmetros e compilação do polígono(b).

Na aba “Geometry” >> “Transforms” clique em “Copy” para fazer cópias de toda a estrutura da lente como mostra Fig. A.17 (a). Então em Graphics selecione todas as partes da geometria da lente clicando diretamente em todas as partes da geometria da lente ou clicando (ctrl+A), como mostra a Fig. A.17(b).

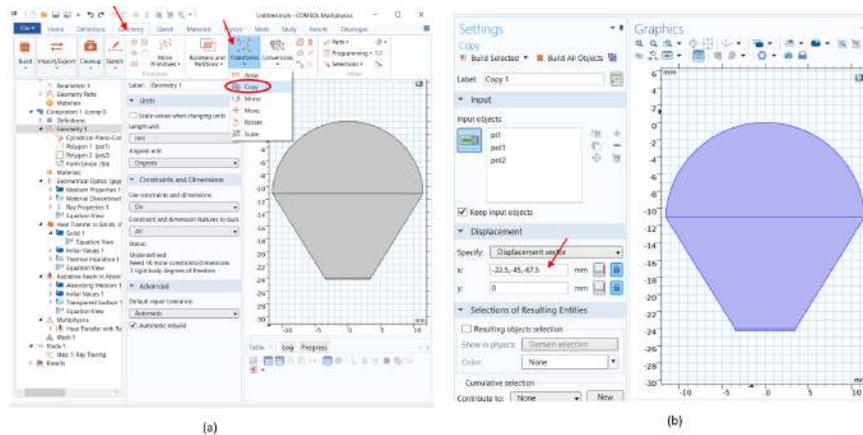


Figura A.17: Passos para fazer cópias da estrutura da lente (a) e posições das cópias das lentes (b).

Para finalizar o procedimento de cópia em “Settings” >> “copy” clique em “Build Selected”. Assim tem-se 4 lentes, como apresenta a Fig. A.18.

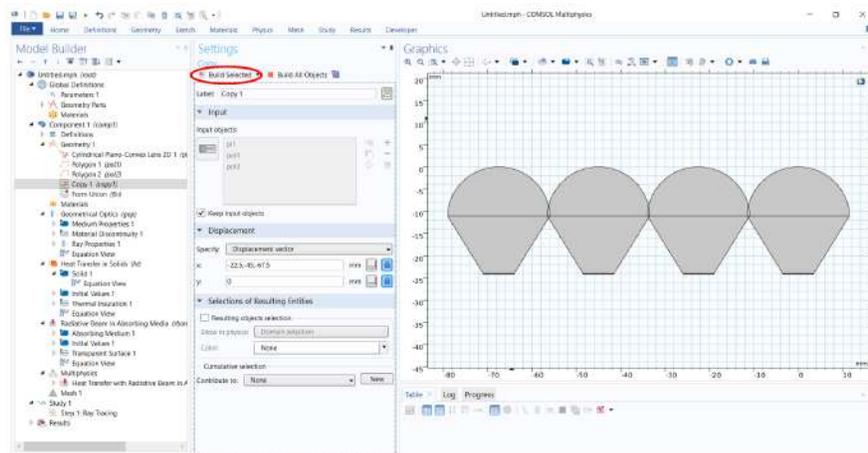


Figura A.18: Lentes prontas.

O próximo passo é criar os caules para cada lente. Iniciando pelo caule da primeira contando da direita para a esquerda. Para isso é preciso inserir um novo polígono que dará o formato a esse caule. As coordenadas do polígono estão apresentadas na Fig. A.19.

Em seguida serão construídos os caule curvos para as demais lentes. Para essas construções serão utilizadas as curvas cúbicas de Bézier.

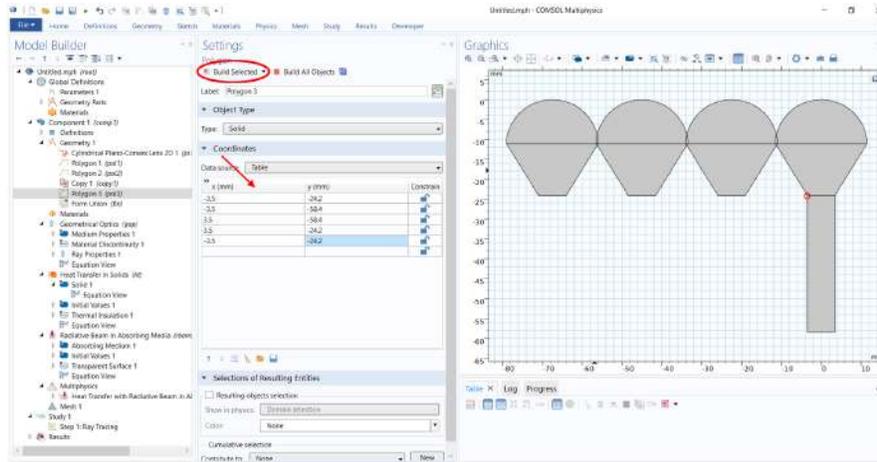


Figura A.19: Caule da primeira lente da direita.

Inserindo as curvas de Bézier para a primeira lente da esquerda como mostra a Fig. A.20(a). Posteriormente iniciar inserindo as coordenadas de cada ponto para a curva e os valores dos pesos de cada um dos pontos como mostra a Fig. A.20(b) e clique em “Build Selected” para construir a curva apresentada na Fig. A.20(b).

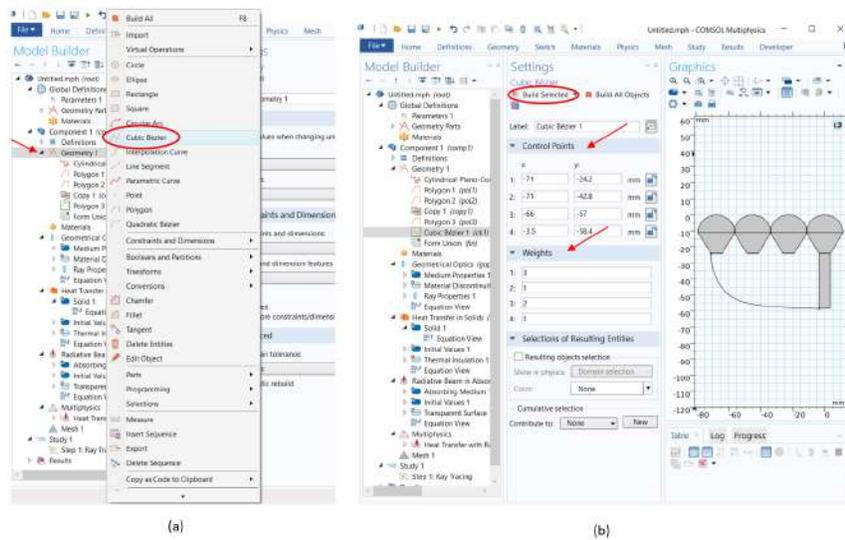


Figura A.20: Passos para inserção da primeira curva de Bézier para a construção de um caule curvo (a). Parâmetros e compilação da curva de Bézier (b).

Em seguida, deve-se inserir a segunda curva de Bézier para a construção do primeiro caule curvo ver na Fig. A.21(a) e Fig. A.21(b).

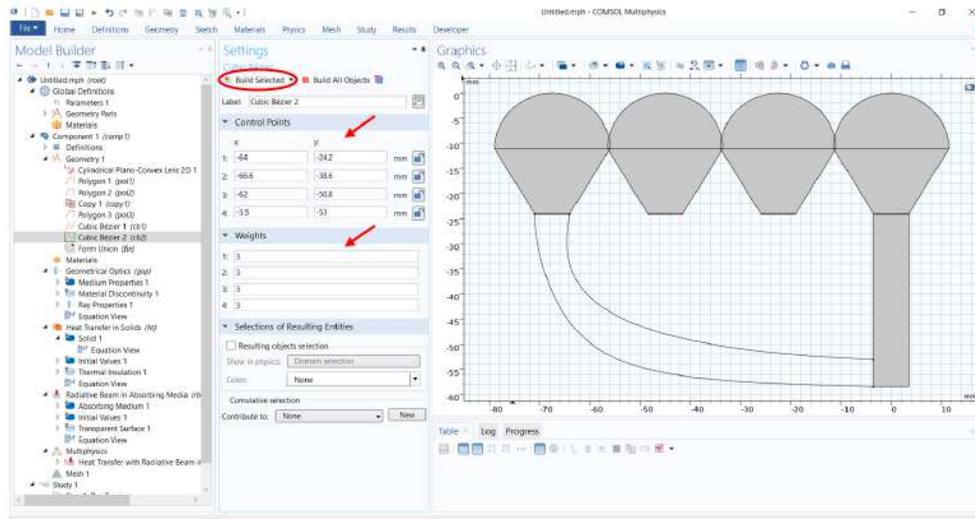


Figura A.21: Parâmetros da segunda curva de Bézier e compilação.

Posteriormente, é preciso inserir dois polígonos para fechar as linhas das curvas de Bézier em suas extremidades. Os parâmetros dos polígonos nas extremidades inferiores ver Fig. A.22(a) e superiores ver Fig. A.22(b).

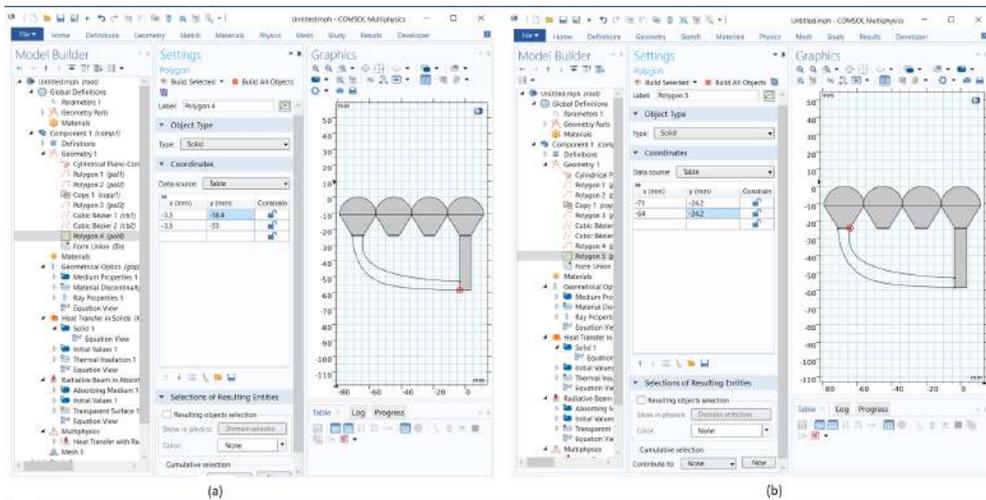


Figura A.22: Polígonos para fechar as extremidades das curvas de Bézier na parte inferior(a) e superior (b).

Esses procedimentos para inserir as curvas cúbicas de Bézier devem ser repetidas

mais 4 vezes para finalizar a construção da geometria do coletor. A inserção dos polígonos para fechar as linhas das curvas de Bézier devem ser inseridas mais 4 vezes. Como o procedimento já foi feito duas vezes a partir de agora somente serão inseridos os parâmetros para as curvas e polígonos restantes apresentados nas Fig. A.23(a) e Fig. A.23(b).

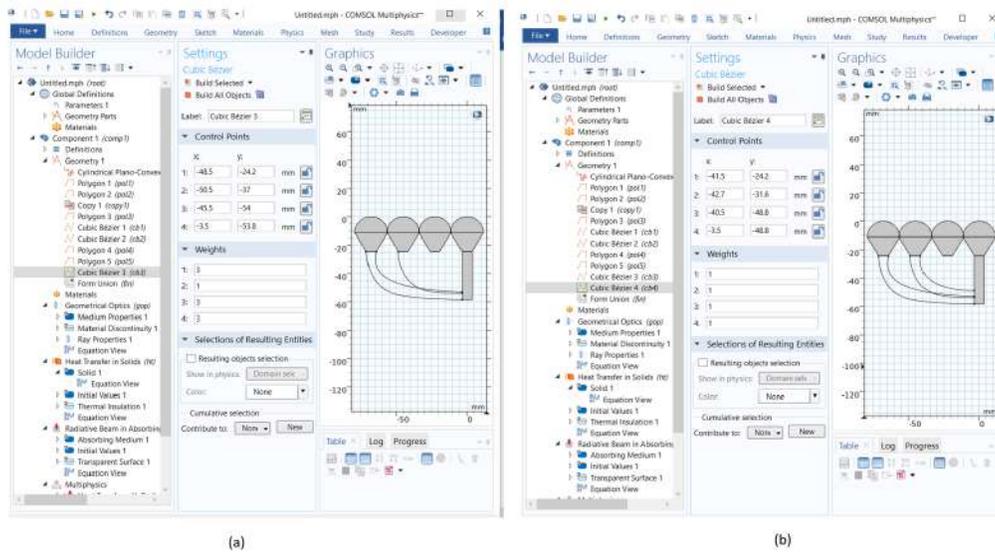


Figura A.23: Parâmetros da terceira (a) e quarta curva de Bézier (b).

Polígonos para fechar as curvas construídas referentes a Fig. A.24(a) e Fig. A.24(b).

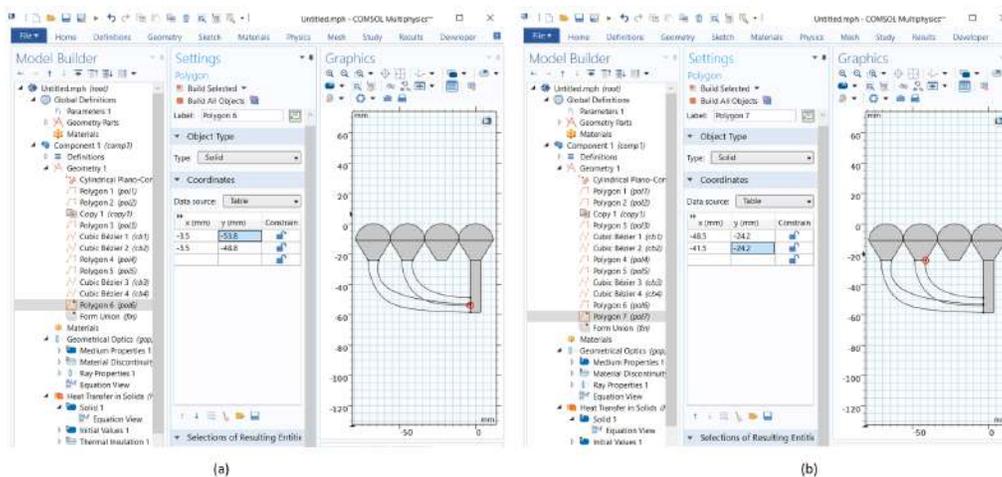


Figura A.24: Polígonos para fechar as extremidades da terceira e quarta curvas de Bézier na parte inferior(a) e superior(b).

Parâmetros referentes as próximas curvas mostradas nas Fig. A.25(a) e Fig. A.25(b).

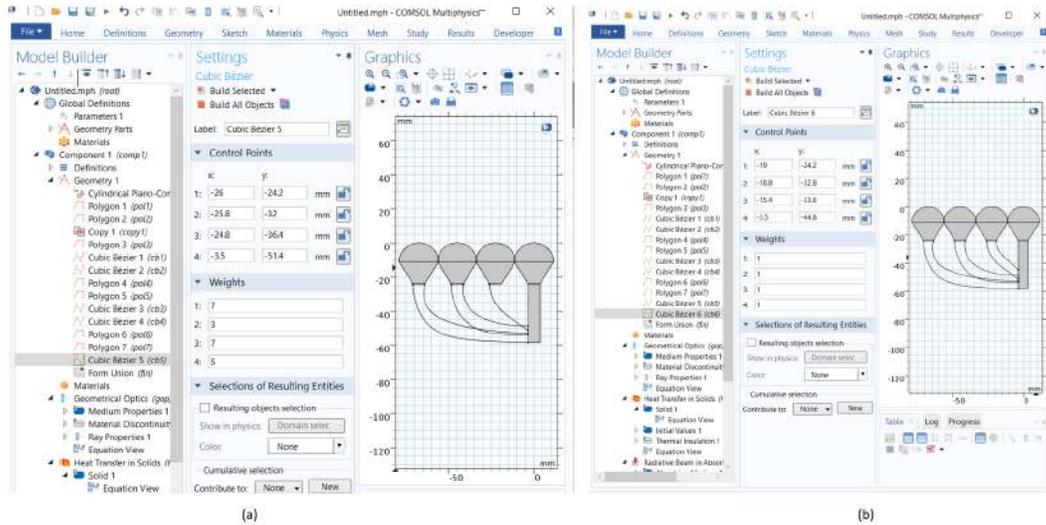


Figura A.25: Construção da quinta (a) e sexta curva de Bézier(b).

Polígonos referentes as curvas apresentadas nas Fig. A.26(a) e Fig. A.26(b).

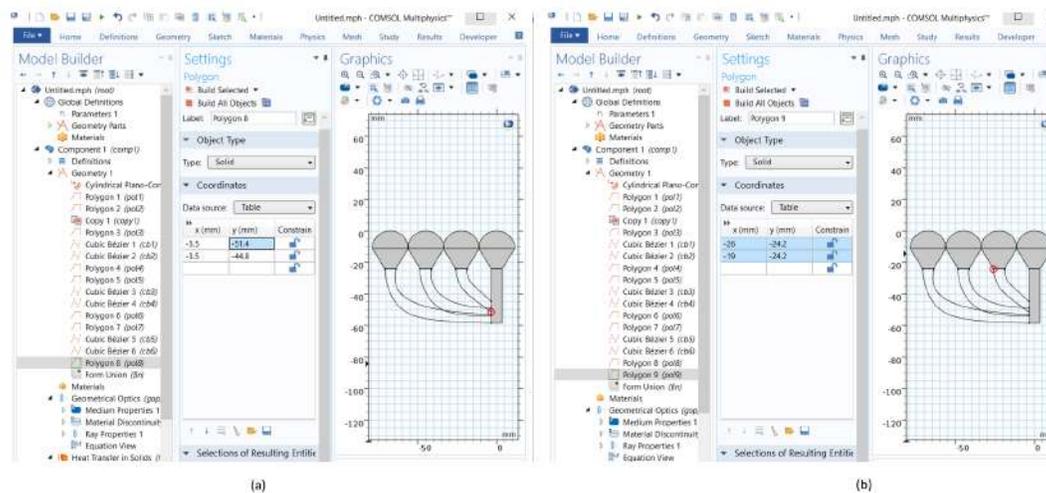


Figura A.26: Polígonos para fechar as extremidades da quinta e sexta curvas de Bézier na parte inferior(a) e superior(b).

Após inseridas as curvas e seus respectivos polígonos é necessário transformar essas linhas construídas em um sólido maciço. Para isso na aba “*geometry*” >> “*Conversions*” clique em “*Convert to Solid*”. Então selecione clicando diretamente em cada umas das linhas das curvas de Bézier construídas, e polígonos que fecham as extremidades das curvas. Então clique em “*Build Selected*”, conforme a Fig. A.27.

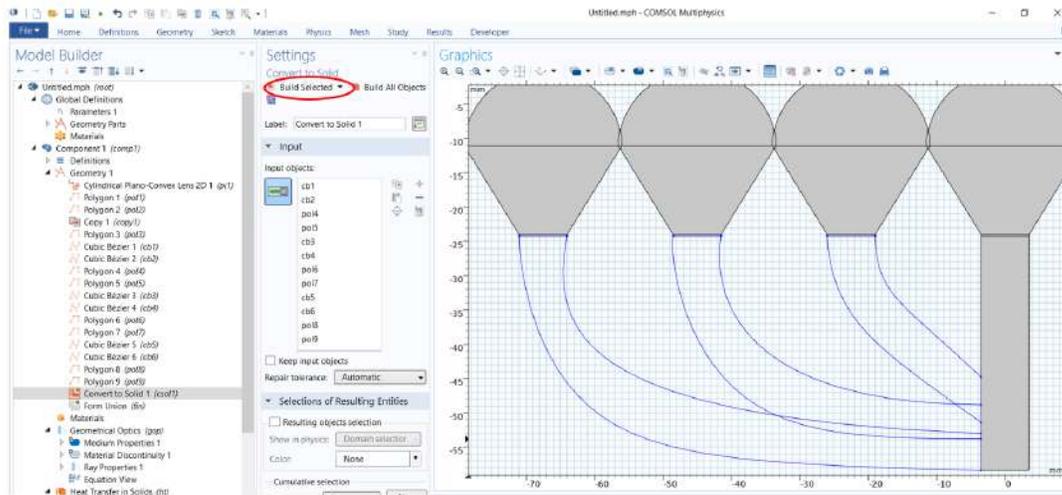


Figura A.27: Convertendo os polígonos e curvas de Bézier para sólidos maciços.

Dessa forma a estrutura se torna uma parte maciça da geometria como mostra a Fig. A.28.

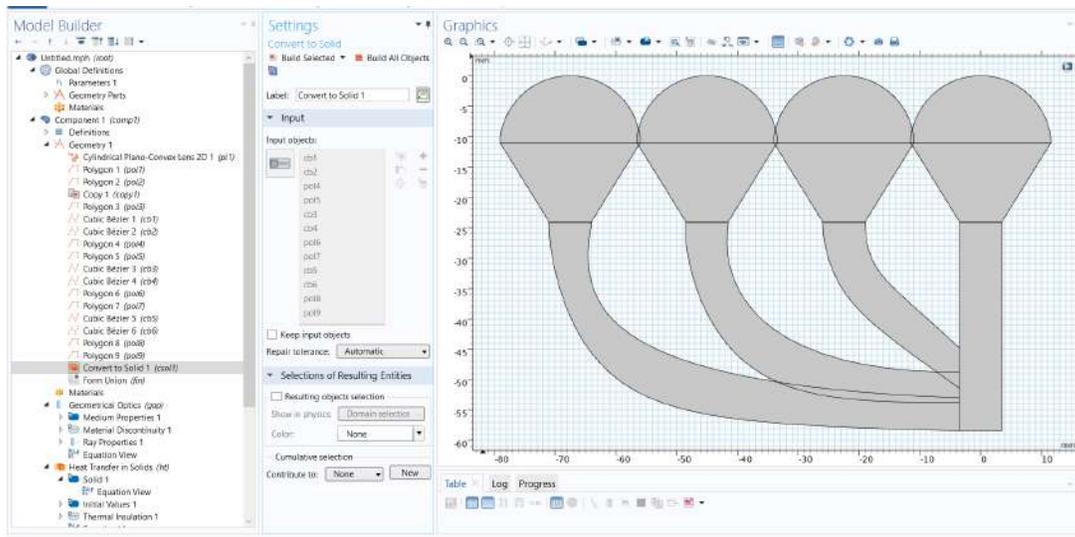


Figura A.28: Caules da lentes prontos.

Agora deve-se inserir um círculo na parte de baixo da geometria. Em “*Model Builder*” >> “*geometry 1*” clique com o botão direito e selecione e clique em “*Circle*” como mostra Fig. A.29(a). Na sequência em “*settings*” insira o valor do raio do círculo em “*Radius*” e defina a posição do círculo em “*position*” usando como referência o eixo y. Então clique em “*Build Selected*” conforme apresenta a Fig. A.29(b).

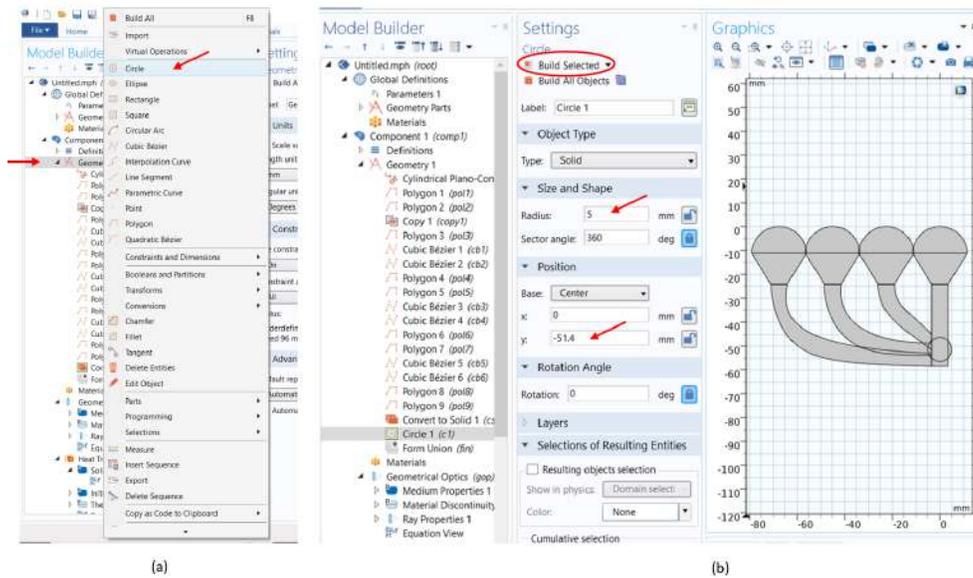


Figura A.29: Inserindo círculo (a) e parâmetros do círculo (b).

Agora deve-se inserir um retângulo, ver nas Fig. A.30(a) e Fig. A.30(b), que servirá para cortar a lente da direita ao meio, pois a intenção é construir um sistema de 3 lentes e meia.

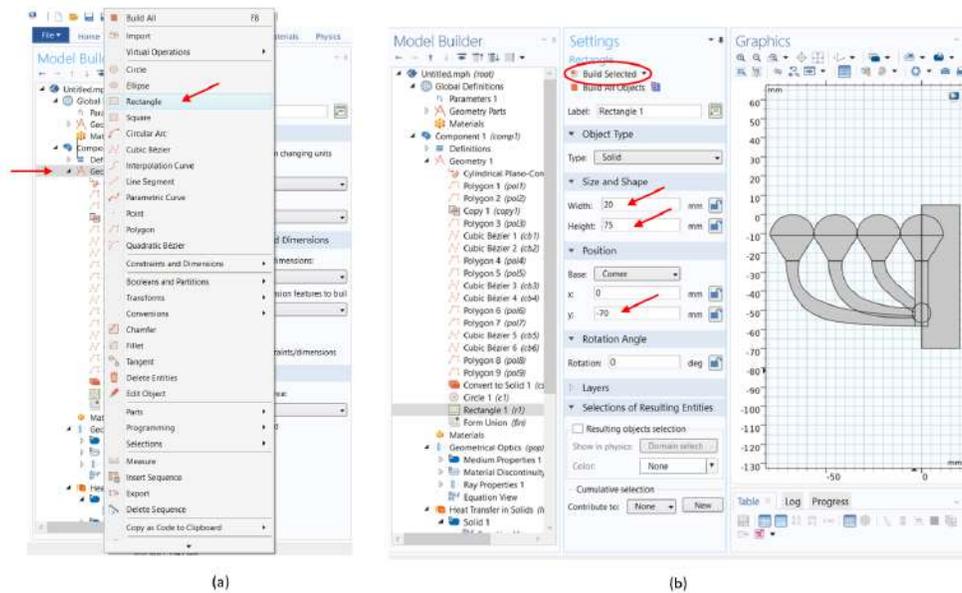


Figura A.30: Cortando a estrutura da primeira lente da direita.

Para cortar a lente na aba “Geometry” >> “Booleans and Partitions” clique em

“Difference”. Na sequência clique em cada parte da estrutura que constitui a lente, caule e círculo que se deseja cortar como mostra a Fig. A.31.

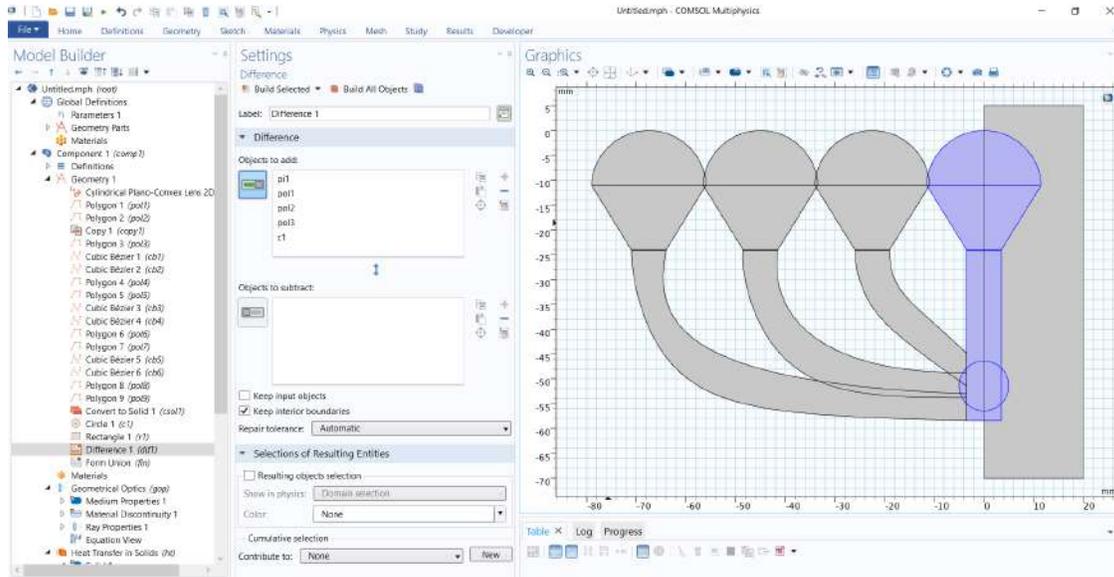


Figura A.31: Selecionando as partes da geometria a serem cortadas.

Para finalizar o corte da lentes em “Settings” >> “Difference” >> “Build Difference” clique em “Objects to Subtract”. Posteriormente, em “Graphics” clique no retângulo para selecioná-lo. Finalmente é só clicar em “Build Selected”.

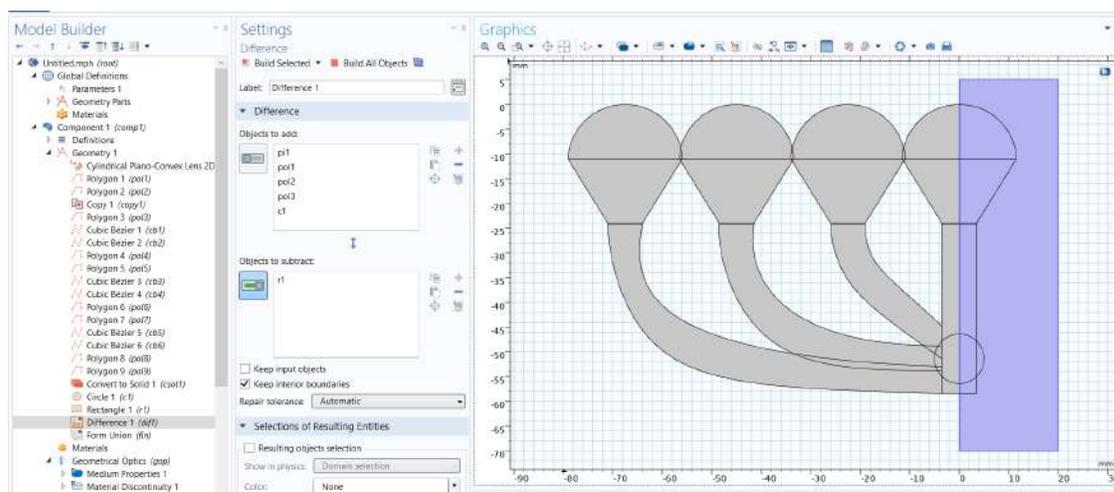


Figura A.32: Selecionando o retângulo para o corte da geometria.

Então a lente é cortada e tem-se o sistema de 3 lentes e meia como mostra a Fig. A.33.

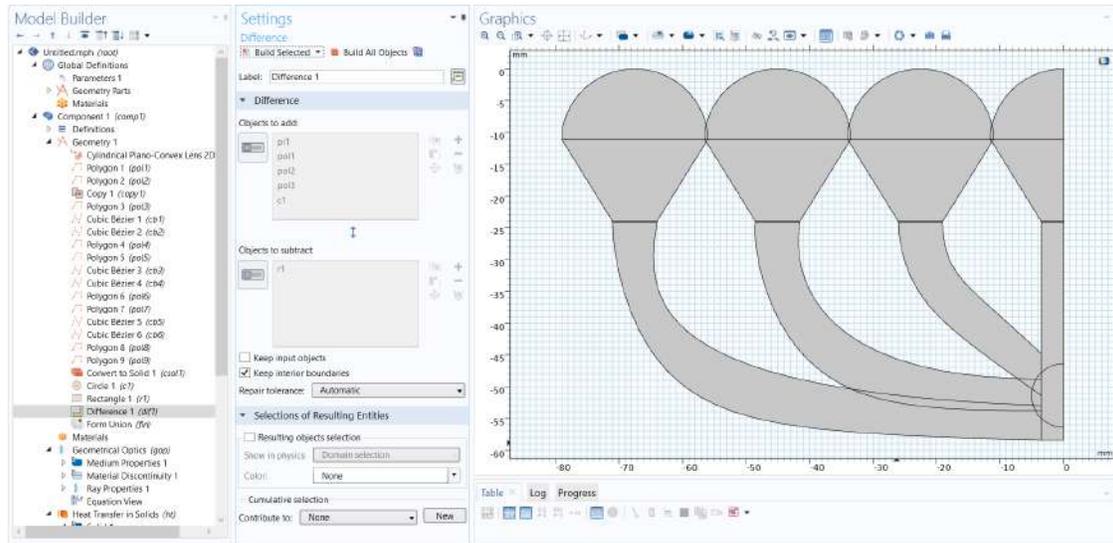


Figura A.33: Sistema de três lentes e meia.

Agora com a geometria construída deve-se torná-la uma estrutura única, ou seja, sem conexões. Na aba “Geometry” >> “Cleanup” clique em “Virtual Operations” e finalmente clique em “Form Composite Domains” como mostra a Fig. A.34(a). Em seguida selecione toda as partes da geometria menos as partes interiores ao semi-círculo apresentado pela Fig. A.34(b).

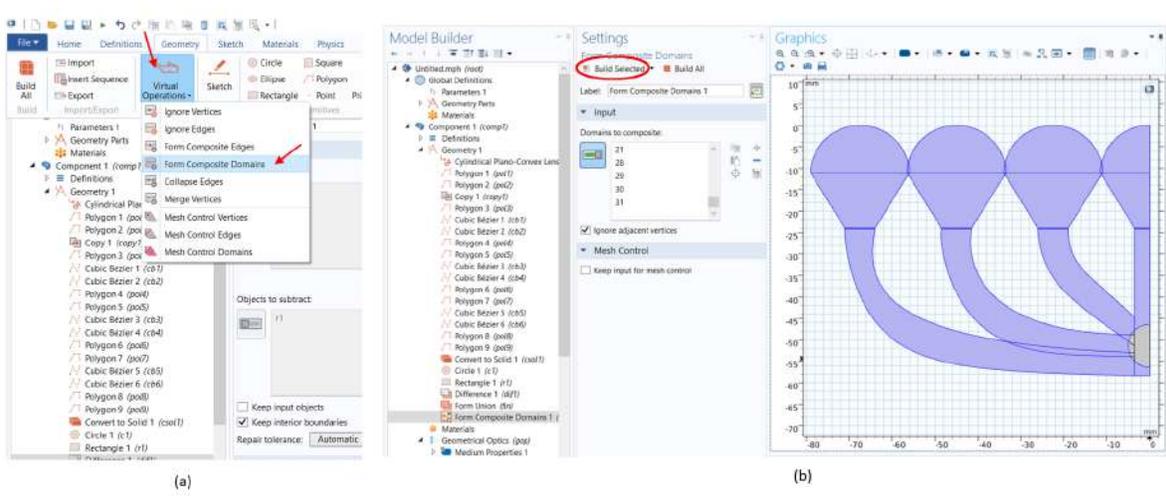


Figura A.34: Convertendo a estrutura do sistema de lentes para uma única peça.

Após a seleção das partes de interesse clique em “Build Selected”. Cada das parte selecionada tornam-se uma estrutura única como mostra a Fig. A.35.

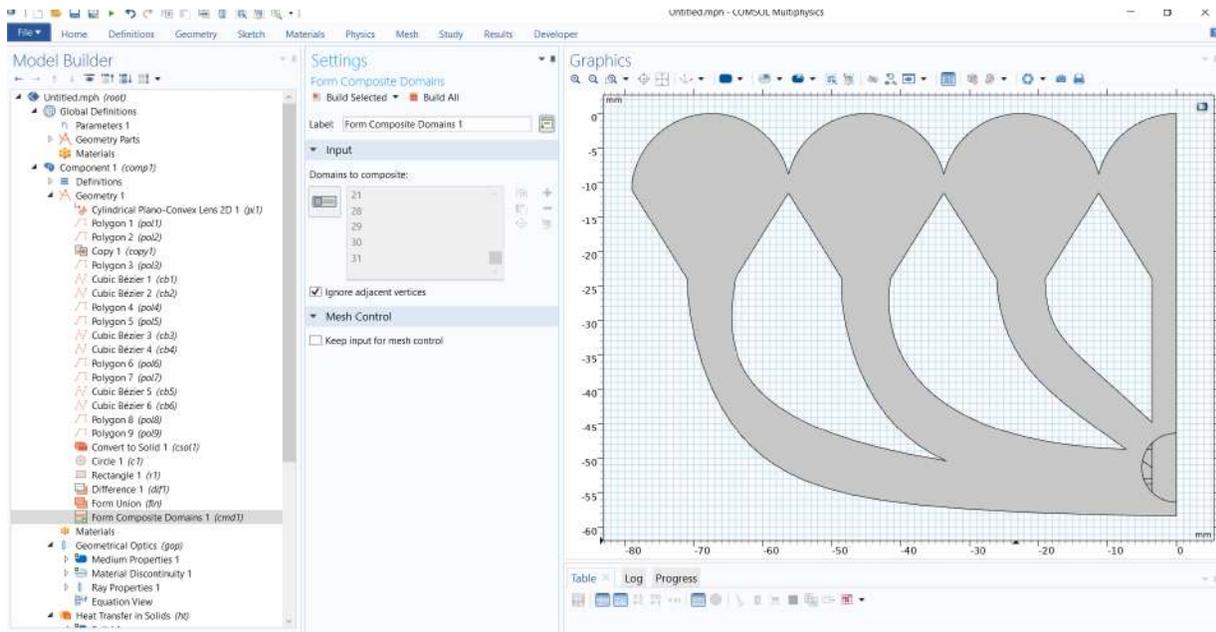


Figura A.35: Estrutura do sistema de lentes em peça única.

O próximo passo é tornar todas as partes interna ao semi-círculo uma estrutura única. Para isso na aba “Geometry” >> “Cleanup” clique em “Virtual Operations” e finalmente clique em “Form Composite Domains” novamente ver Fig.A.36(a). Selecione todas as partes internas ao semicírculo e clique em “Build Selected” ver Fig. A.36(b).

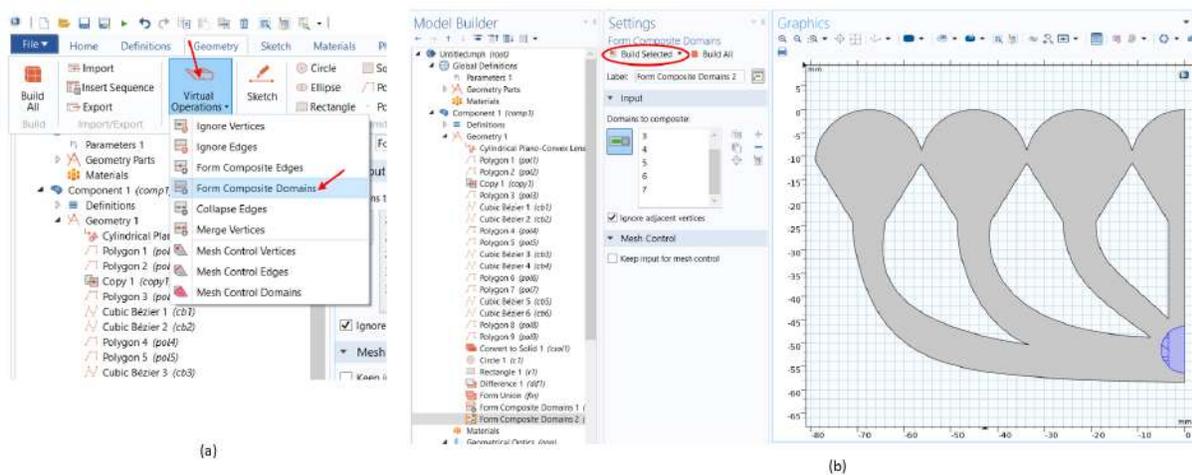


Figura A.36: Convertendo o semi-círculo (cubeta) para uma única peça.

Então na Fig. A.37 tem-se a estrutura do concentrador pronta.

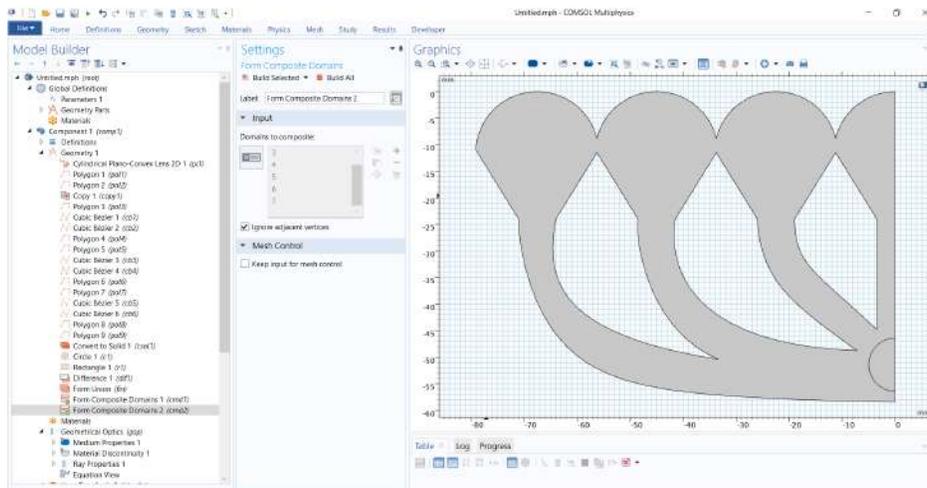


Figura A.37: Cubeta em estrutura única.

### A.3 Testagem da Trajetória dos Raios e Intensidade da Luz

Inicialmente, é preciso definir os materiais que constituem cada domínio (parte) do concentrador solar.

Na subseção “Materials” clique em “Add Material” como mostra a A.38(a), em seguida em “Add Material ” na caixa de diálogo pesquise por “Silica Glass” então clique duas vezes na opção silica glass como mostra a Fig. A.38(b).

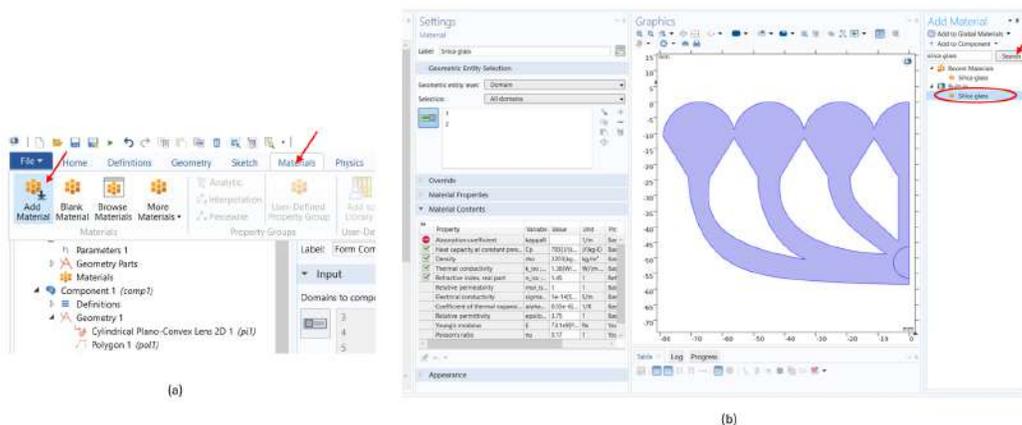


Figura A.38: Inserindo o vidro de sílica na estrutura do coletor.

O próximo passo é definir o domínio que será constituído por sílica glass, pois todos domínios estarão automaticamente selecionados como mostra a Fig. A.38. Então deve-se clicar no semi-círculo para tirá-los da seleção conforme a Fig. A.39. Posteriormente, é necessário definir o índice de refração (“*Refractive Index*”) para o vidro e coeficiente de absorção (“*Absorption Coefficient*”) os valores são mostrados na Fig. A.39.

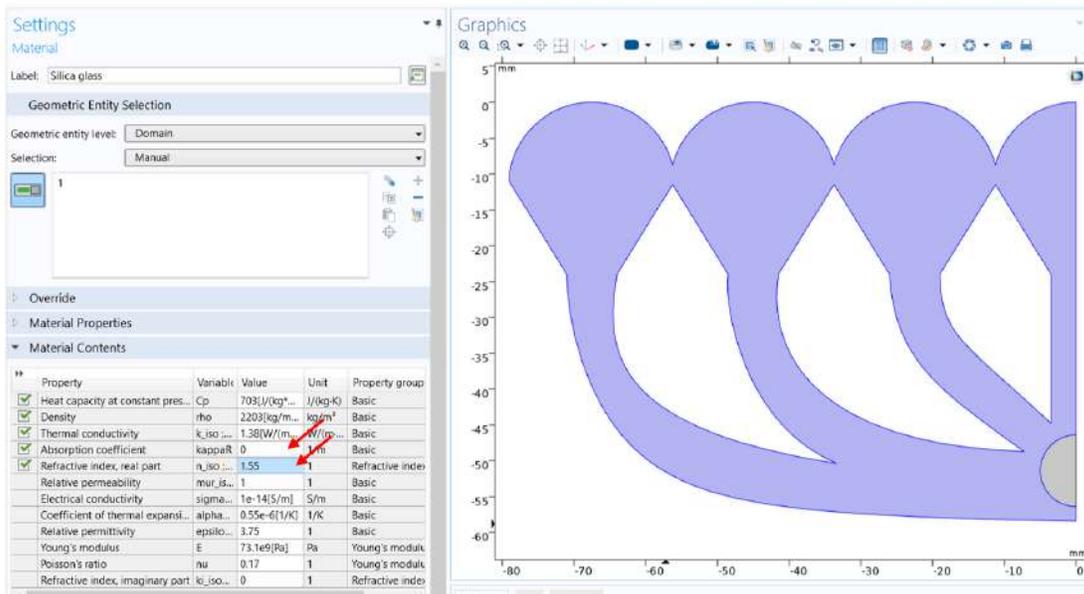


Figura A.39: Inserindo o índice de refração e coeficiente de absorção solar do vidro de sílica.

Agora só falta definir o material que constituirá o semi-círculo(cubeta). Para inserir o novo material na mesma janela onde foi inserido a sílica glass anteriormente na caixa de diálogo pesquise por “**Water, liquid**” e clique duas vezes no material que apresentar esse nome conforme a figura 40. Em seguida deve-se definir o índice de refração (“*Refractive Index*”) e o coeficiente de absorção solar da água (“*Absorption Coefficient*”), valores apresentados na A.40. O valor para o coeficiente de absorção leva em consideração o espectro solar para os comprimentos de ondas de 300 a 1200 nm.

Agora serão definidos os parâmetros do módulo de óptica geométrica.

Na subseção “*Model Builder*” >> “*Component1 (comp1)*” clique em “*Geometrical Optics (gop)*”. Então com o cursor sobre “*Geometrical Optics (gop)*” clique com o botão direito e selecione e clique em “*Material Discontinuity*” para inserir o “*Material Discontinuity 2*” será responsável por definir a deconstinuidade nas interfaces do vidro com o ambiente na

estrutura do concentrador onde ocorrerá a reflexão interna total da luz.

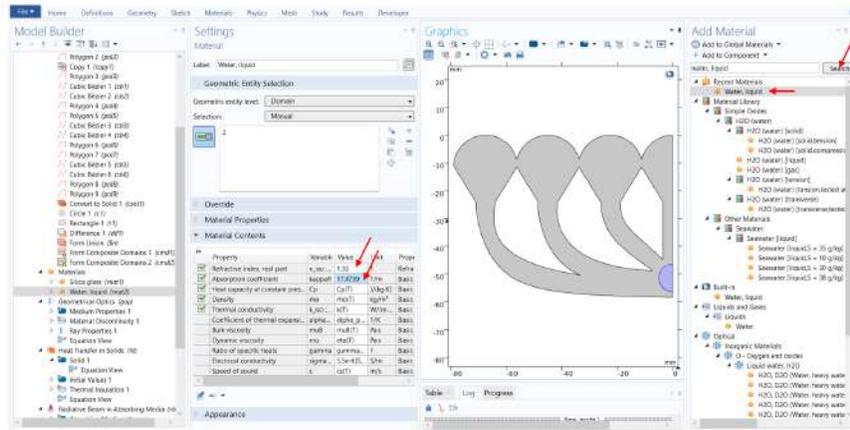


Figura A.40: Inserindo água na Cubeta e definindo o índice refração e coeficiente de absorção solar.

Posteriormente, clique em “*Material Discontinuity 2*”, como apresenta a Fig. A.41(a), e em seguida selecione cada uma das bordas da geometria do concentrador menos as superiores como mostra a Fig. A.41(b). O próximo passo é inserir e definir as paredes do semicírculo(cubeta).

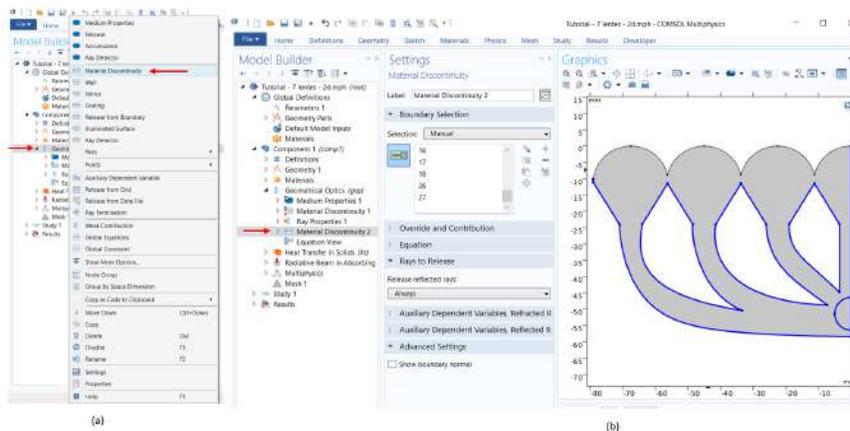


Figura A.41: Descontinuidade 2 da geometria do concentrador solar.

Para definir as paredes (Wall 1) do semi-círculo clique em “*Geometrical Optics (gop)*” com o cursor sobre ele clique com o botão direito e em seguida clique em “*Wall*” na nova janela que aparecer conforme a Fig. A.42(a). As paredes (wall 1) irão definir a descontinuidade na interface do vidro com a água, de modo que os raios de luz incidentes sobre ela fixam nela.

Na sequência selecione as bordas do semicírculo clicando diretamente na borda circular do semicírculo somente, como mostra a Fig. A.42(b).

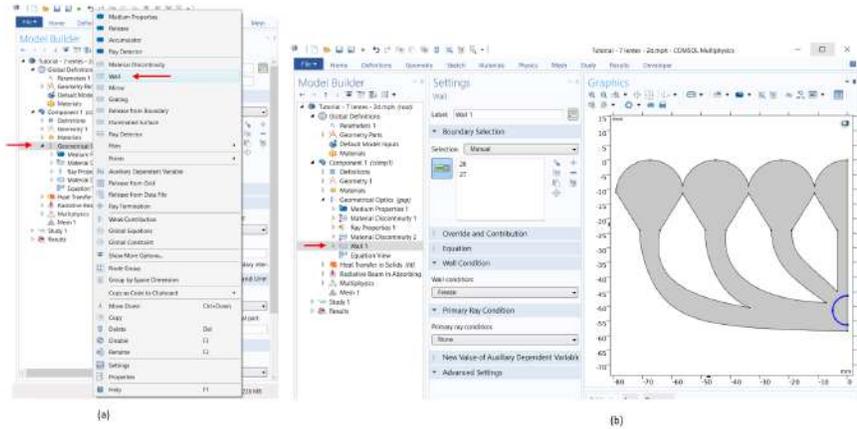


Figura A.42: Paredes da cubeta (Wall 1) (a) e condições de contorno da mesma(b).

Para definir mais uma parede (Wall 2) novamente clique em “*Geometrical Optics (gop)*” com o cursor sobre ele clique com o botão direito e em seguida clique em “*Wall*” na nova janela que aparecer conforme a Fig. A.43(a). A parede (Wall 2) defini a descontinuidade na interface entre o vidro e o ambiente. Ela foi inserida somente para fins estéticos, fixar um raio de luz nela evitando que escape abaixo do tubo receptor. Na sequência selecione a borda abaixo do semicírculo clicando diretamente nela, como mostra a Fig. A.43(b).

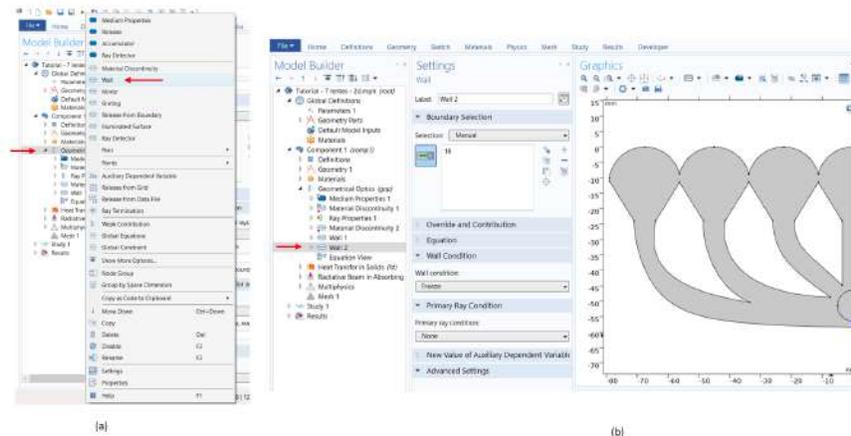


Figura A.43: Parede vertical (Wall 2) abaixo da cubeta (a) e condições de contorno da mesma (b).

Agora é só definir as condições de descontinuidade em “*Material Discontinuity 1*”.

Para clique em “Material Discontinuity 1” na sequencia em “Settings” >> “Material Discontinuity” >> “Rays to Release” >> “Release Reflected Rays” clique em “Always” e selecione e clique em “never”. Essa condição de descontinuidade vai definir a superfície superior do concentrador como transparente para luz incidente.

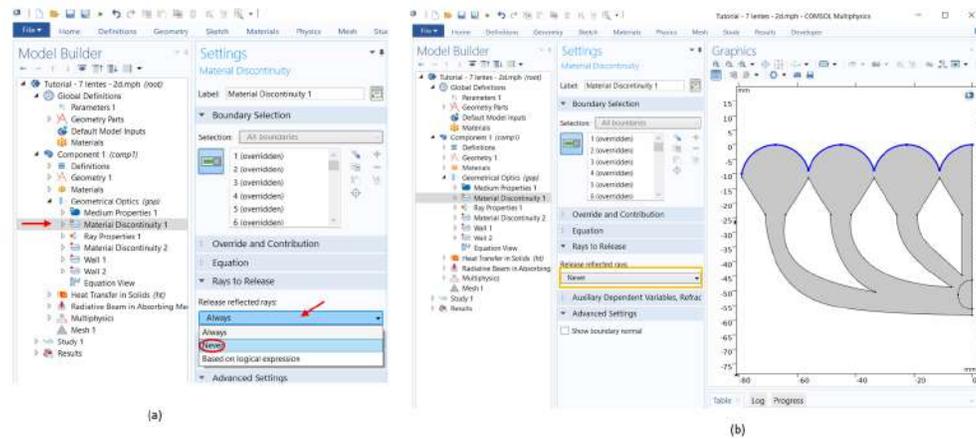


Figura A.44: Condições de contorno da interface superior da geometria.

Para definir as grandezas físicas a serem computadas clique em “Geometrical Optics (gop)” em seguida em “Settings” >> “Geometrical Optics” >> “Intensity Computation” >> “Intensity Computation” clique em “none” então selecione clique em “Compute intensity and power”, conforme Fig. A.45(a) e Fig. A.45(b).

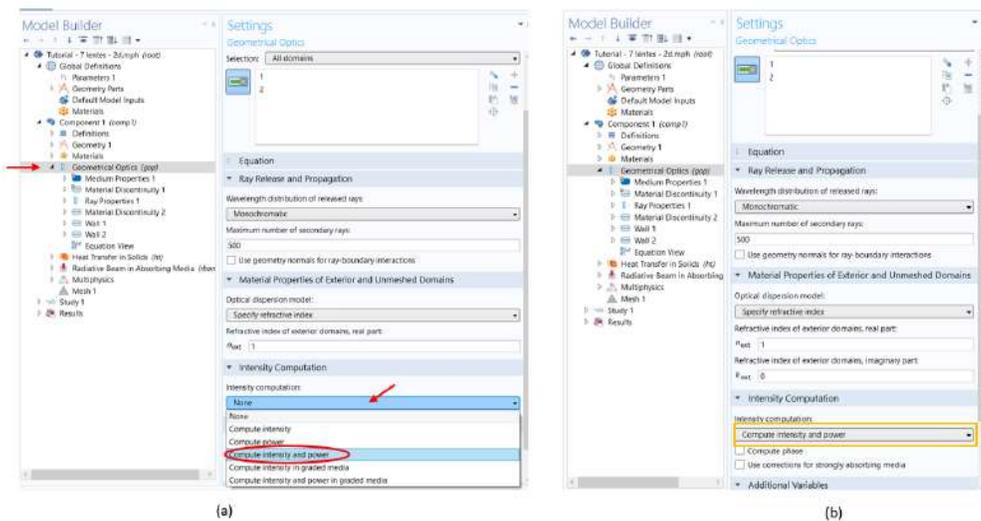


Figura A.45: Grandezas físicas a serem camputadas (a) intensidade e potencia (b).

Para definir as condições de descontinuidade do “Material Discontinuity 2” clique em “Material Discontinuity 2” na sequência em “Settings” >> “Material Discontinuity” >> “Rays to Release” >> “Release Reflected Rays” em “Threshod Power”: na caixa de diálogo ( $Q_{th}$ ) digite 5 [W] de acordo com as Fig. A.46(a) e Fig. A.46(b).

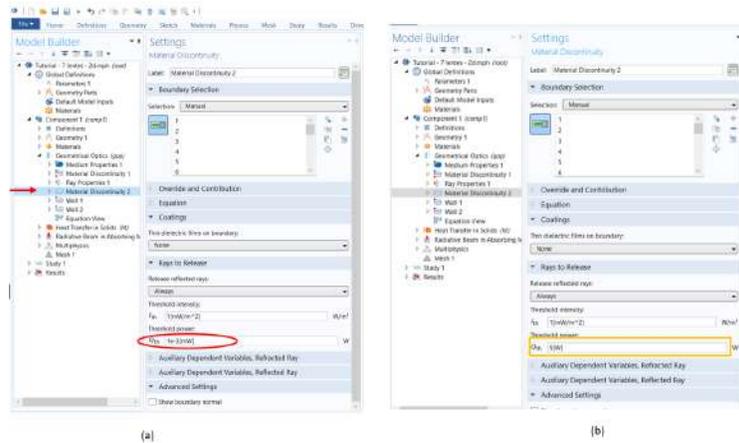


Figura A.46: Condição de contorno para reflexão nos caules das lentes.

O “Threshod Power” é um limitador de potência dos raios de luz, para raios com valor de potência menor 5[w] não haverá reflexão.

Definindo o acumulador para a superfície superior do concentrador. Ele responsável por computar a intensidade da luz que atinge a superfície superior do dispositivo. Em “geometry optics (gop)” clique em “Material Discontinuity 1” com o cursor sobre ele clique com o botão direito do mouse e na janela que abrir clique em “acumulador”.

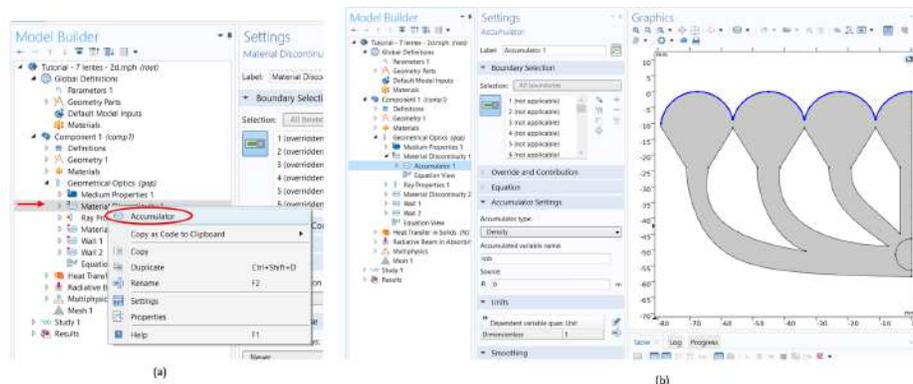


Figura A.47: Variável acumuladora (a) para interface superior do concentrador (b).

Então é só definir a variável a ser computada e sua quantidade dependente. Para isso

em “Settings” >> “Acumulator” >> “Acumulator Settings” >> “Source : R” digite **gop.I** , em “Units” busque por “Intensity” clique em OK, como mostra a Fig. A.48(a) a final essa parte deve ficar como mostra a Fig. A.48(b).

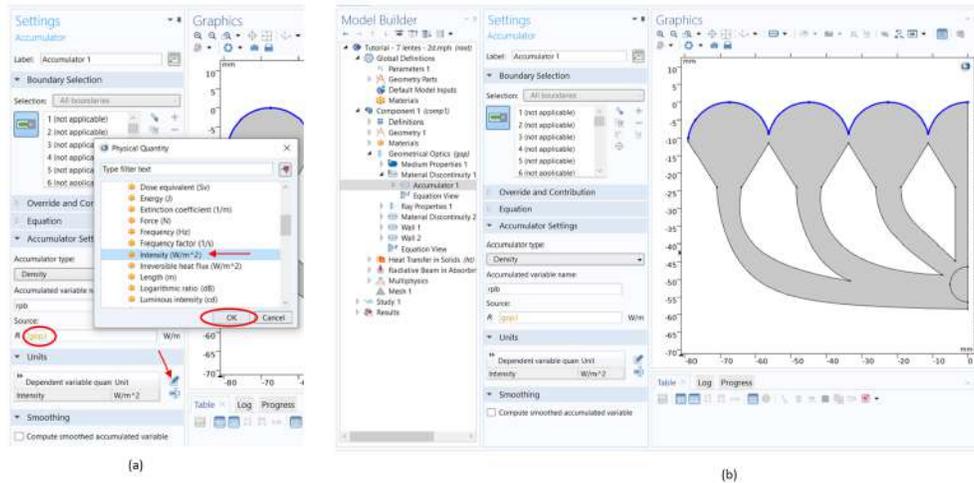


Figura A.48: Inserindo a grandeza física (a) a ser contabilizada pelo acumulador (b).

O próximo acumulador é o da cubeta. Para defini-lo é só clicar em “Wall 1” ainda com o cursor sobre ele clica-se com o botão direito do mouse e clicar-se com o botão esquerdo do mouse em acumulador que aparecerá em nova janela como mostra a Fig. A.49(a).

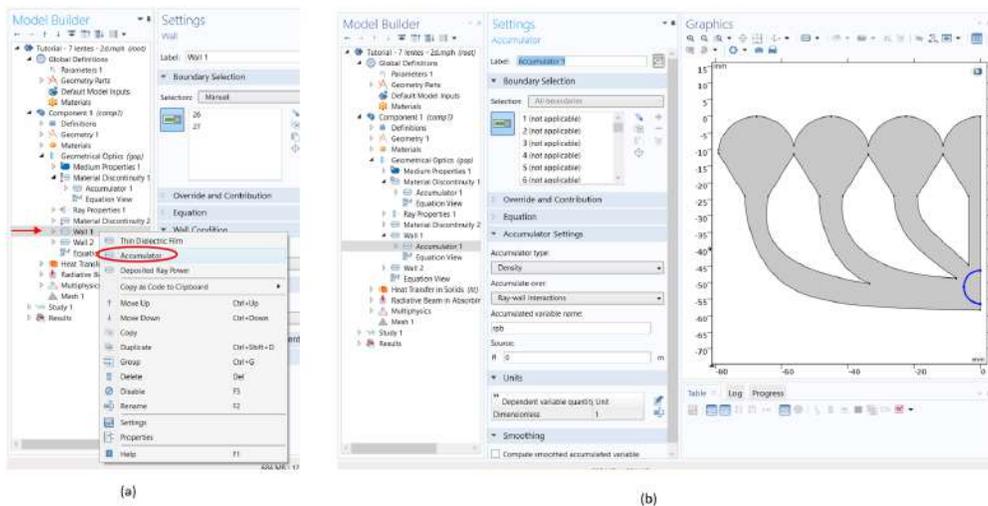


Figura A.49: Acumulador(a) da interface (parede) vidro-água da cubeta (b).

Finalmente, em “Settings” >> “Acumulator 1” >> “Acumulator Settings” >>

“Source : R” digite (gop.I), em “Units” busque por “Intensity” selecione e clique OK, Con-  
forme a Fig. A.50.

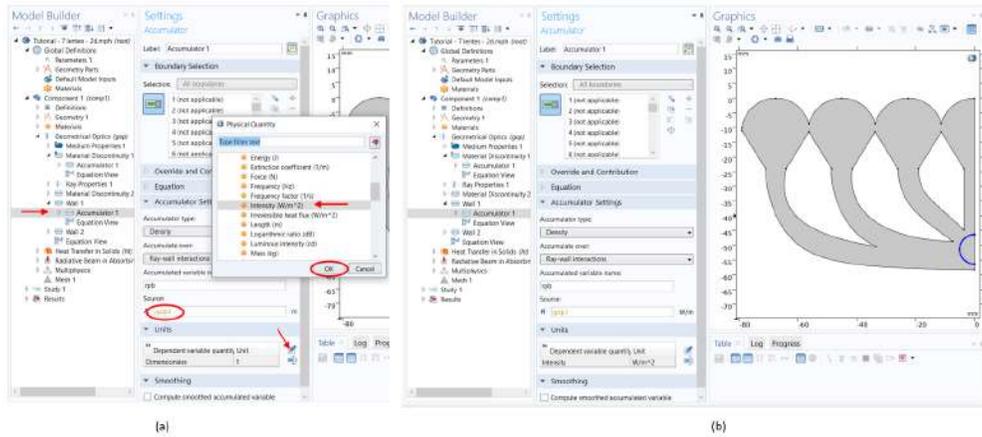


Figura A.50: Grandeza física (a) a ser contabilizada pelo acumulador da cubeta (b).

Para a liberação dos raios de luz clique em “Geometrical Optics (gop)” com o cursor sobre ele clique com o botão direito e procure por “Release from grid” e clique nele como mostra a Fig. A.51(a). Então aparecera uma nova janela como mostra a Fig. A.51(b).

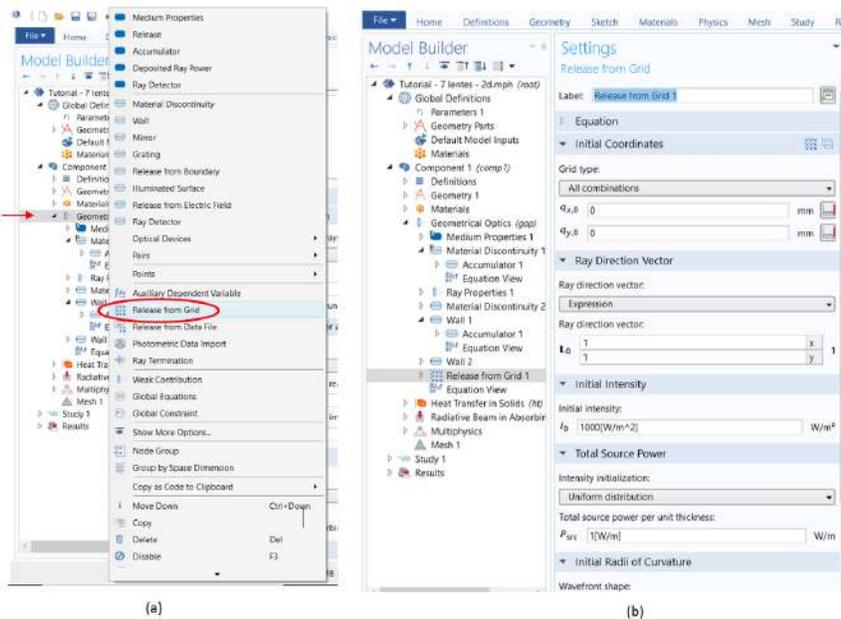


Figura A.51: Liberação dos raios de luz (a) e condições iniciais dos mesmos (b).

Agora é preciso definir a posição e orientações iniciais dos raios de luz. Em “Settings”  
>> “Release from Grid” >> “Initial Coordinates” definir os para  $(q_{x,0})$  e  $(q_{y,0})$  essas são as

componentes do vetor posição dos raios de luz, ver na Fig. A.52. Em seguida definir ray direction vector na caixa de dialogo de  $L_0$  atribuindo 0 para x e -1 para y. Dessa forma define-se a posição inicial das componentes do vetor posição do feixe de luz, nesse caso para liberação dos raios na direção -y. A intensidade inicial em “Settings” >> “Release from Grid” >> “Initial Intensity” >> “Initial Intensity:”  $I_0 = 0.06610[W/m^2]$ , conforme a Fig A.52. Esse valor corresponde a intensidade de 1000 Watts por unidade de área distribuida na superfície superior do coletor solar.

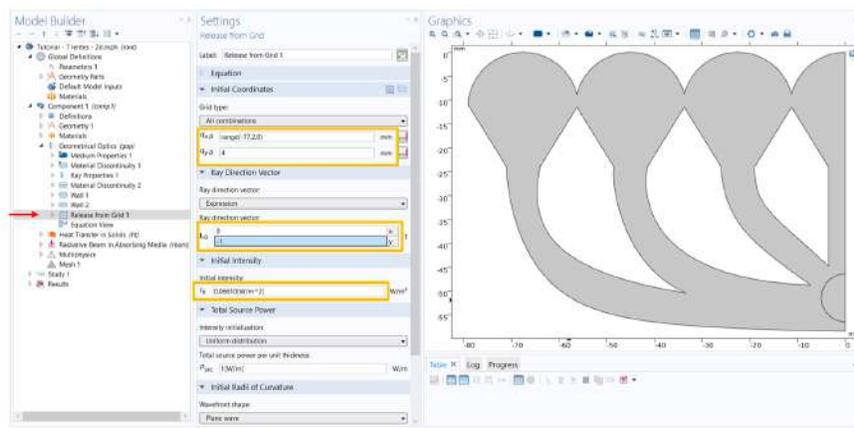


Figura A.52: Definindo as condições iniciais do raios de luz a serem liberados.

O comprimento de onda pode ser definido em “Model Builder” >> “Component 1” >> “Geometry Optics (gop)” clique em “Ray Properties 1”. Então em “Settings” >> “Ray Properties 1” >> “Ray Properties” >> “Vacuum Wavelength:” digite o valor do comprimento onda 550 [nm] de acordo com a Fig. A.53. Comprimento de onda de elevada absorção pela água.

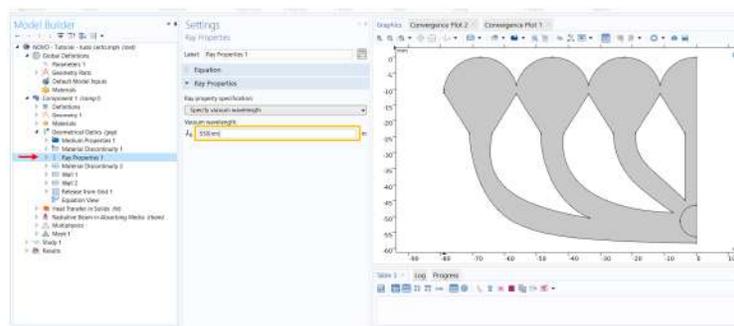


Figura A.53: Definindo o comprimento de onda.

Para iniciar o estudo é preciso definir os parâmetros para a malha de elementos finitos.

Em “*Model Builder*” >> “*Component1 (comp1)*” clique em “*Mesh 1*”. Então em “*Settings*” >> “*Mesh*” >> “*Physics-Controlled Mesh*” >> “*Element Size:*” clique em “*Normal*” como na Fig. A.54(a), selecione “*Finer*” conforme a Fig. A.54(b) então uma nova janela aparecera como mostra a Fig. A.54(c).

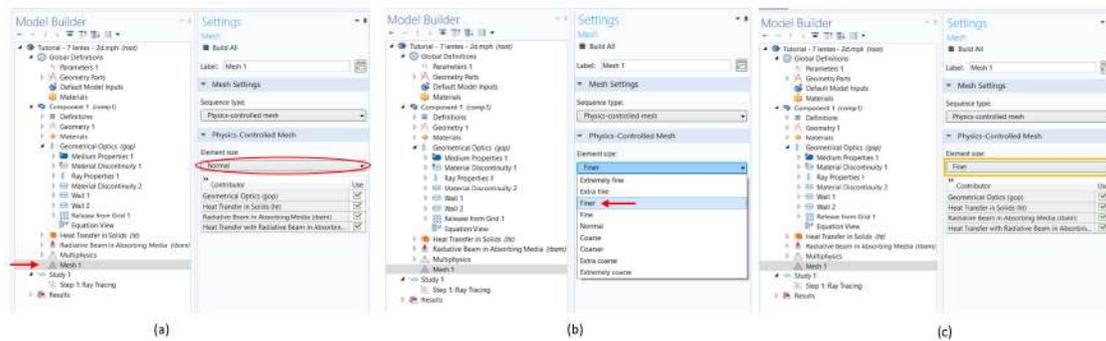


Figura A.54: Definindo os parâmetros iniciais da malha de elementos finitos.

Clique e selecione “*User-controlled mesh*”. Em seguida em “*Model Builder*” >> “*Component1 (comp1)*” clique em “*size*”. Na sequência em “*Settings*” >> *size* >> “*Element size*” clique em “*Custom*”. Finalmente em “*Element Size*” >> “*Parameter*” insira os parâmetros mostra em clique em “*Size*”, de acordo com as Fig A.55(a), Fig A.55(b).

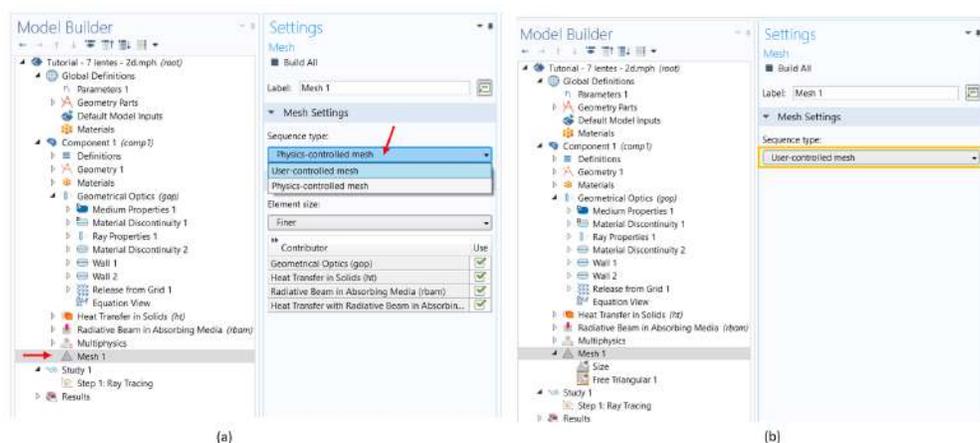


Figura A.55: Tornando a malha de elementos finitos controlável pelo usuário.

O próximo passo é definir cada um dos parâmetros da malha como indica a Fig. A.56

(a) e A.56(b). Então clique em “*Build All*” para o Comsol executar a malha.

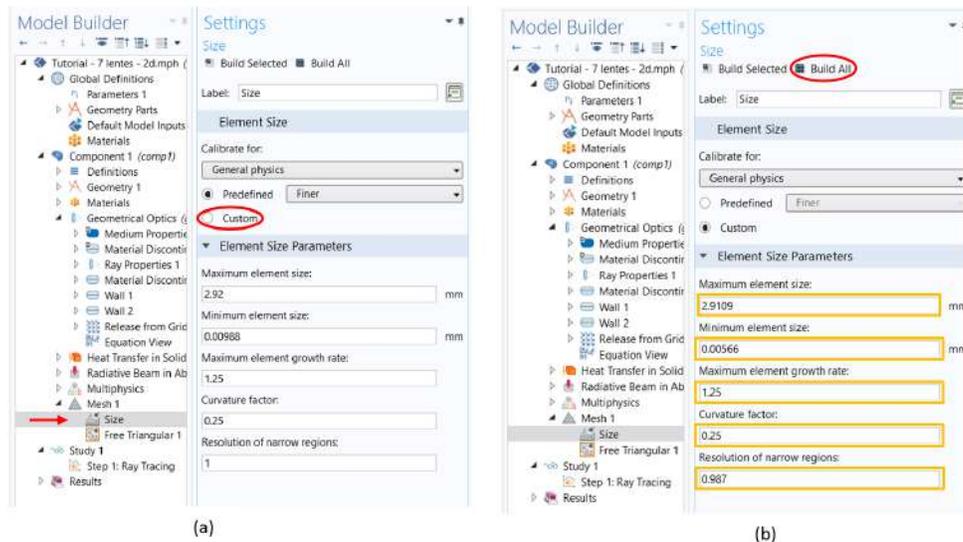


Figura A.56: Definindo a malha como personalizada (a) e parâmetros da malha (b).

Feito tudo isso aparecerá a malha de elementos conforme definida, ver Fig. A.57.

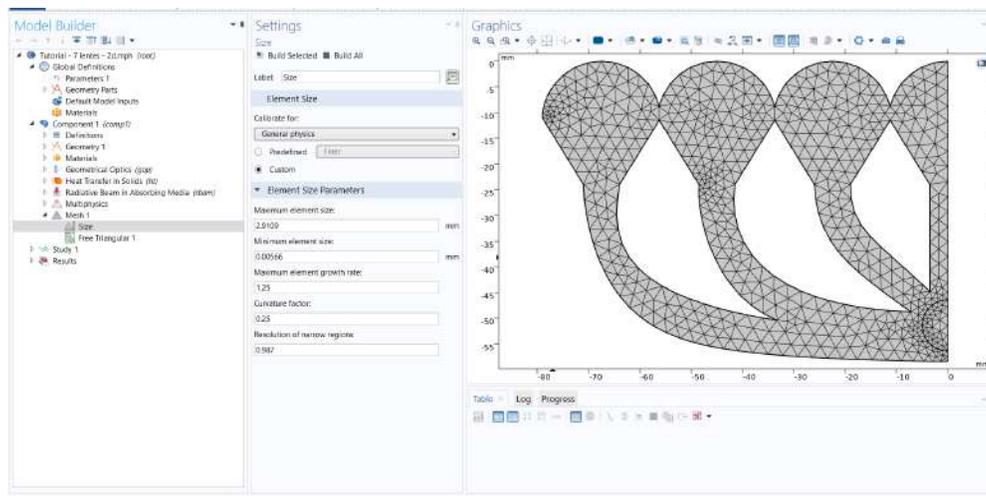


Figura A.57: Malha de elementos finitos conforme definida pelo usuário.

A partir de agora é possível executar e ver a simulação para análise óptica. Esse passo é importante, pois informa qualquer erro que possa ter ocorrido e já carrega os gráficos automaticamente.

Para executar a simulação em “*Model Builder*” >> “*Component 1 (comp 1)*” >> “*Study 1*” clique em “*Step 1: Ray tracing*”, posteriormente em “*Setting*” >> “*Ray Tracing*”

clique em “**Compute**”, como indica a Fig. A.58(a). Ainda em “*Setting*” >> “*Ray Tracing*” >> “*Study Settings*” modifique o tempo de estudo em “*times*”, ver Fig. A.58(b).

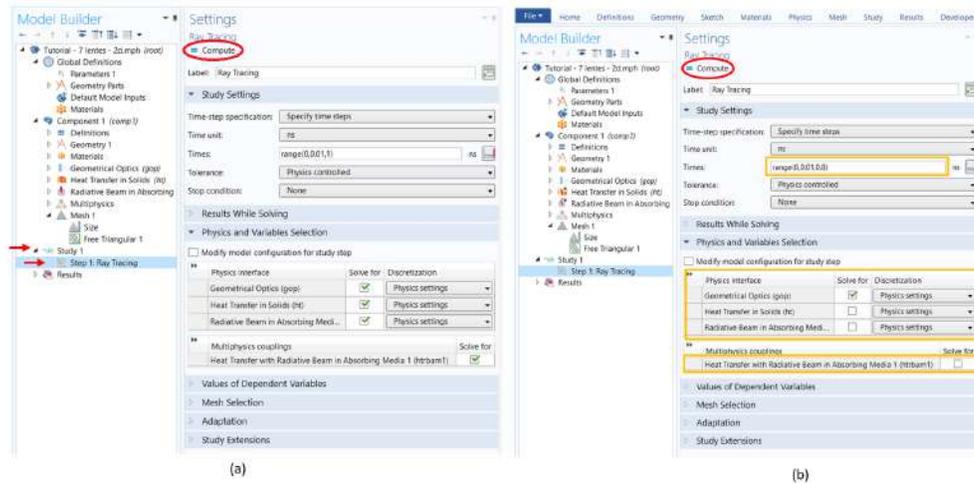


Figura A.58: Executa da simulação inicialmente (a) e redefine o tempo, os módulos a serem utilizados nesse estudo e executa novamente a simulação (b).

Então após a simulação será possível ver a trajetória dos raios luz através da geometria do concentrador como mostra a Fig. A.59.

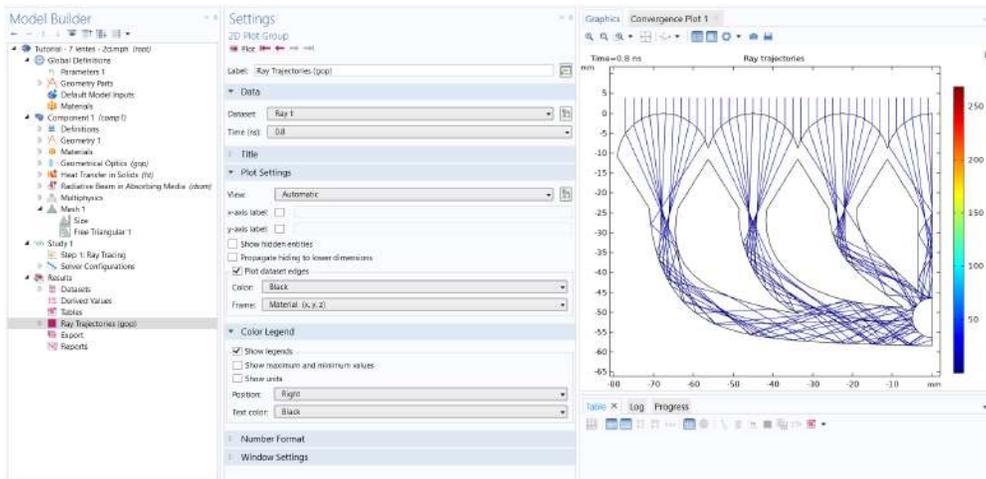


Figura A.59: Trajetória dos raios de luz.

Os Resultados da intensidade luminosa nas lentes e cubeta podem ser vistas. Para isso em “*Model Builder*” >> “*Results*” clique em “*Derived Values*” com o cursor sobre ele clique com o botão direito e na nova janela clique em “*Global Evaluation*” conforme figura

60(a). Na sequência em “Settings” >> “Global Evaluate” >> “Expressions” clique em “Add expression” (+) e na nova janela clique duas vezes em “*gop.matd1.bacc1.rpb\_sum - Sum of accumulator variable rpb -  $Wm^2$* ”. Essa variável apresenta a intensidade/potência da luz na superfície das lentes.

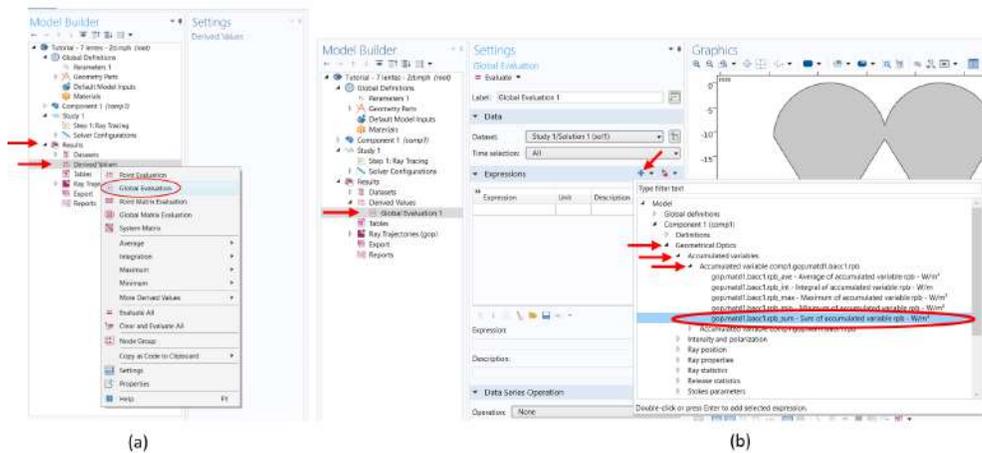


Figura A.60: Apresenta os resultados guardados nas variáveis acumuladoras (a) seleção da variável do acumulador da interface superior do coletor.

Para ver a intensidade da luz que chega na cubeta. O procedimento é análogo ao feito para a intensidade da luz para as lentes. Em “Settings” >> “Global Evaluate” >> “Expressions” >> clique em “Add expression” na nova janela clique duas vezes em “*gop.wall1.bacc1.rpb\_sum - Sum of accumulator variable rpb -  $Wm^2$* ”, ver na Fig. A.61(a). A Fig. A.61(b) mostra como editar a “Description”(descrição) das variáveis selecionadas.

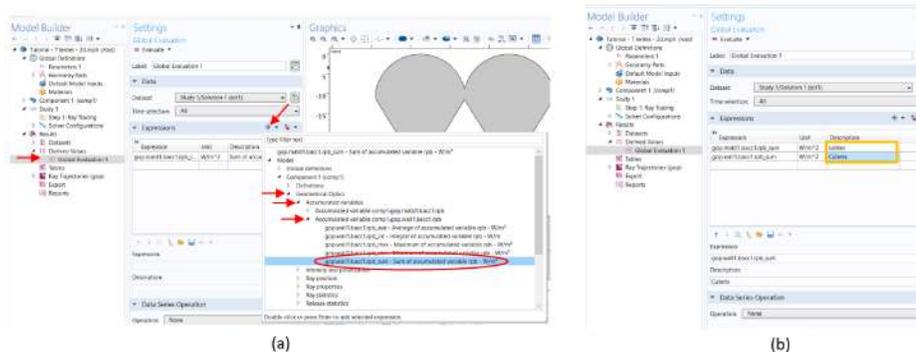


Figura A.61: Variável do acumulador da interface da cubeta (a) descrição das variáveis (b).

Agora é só definir o tempo do resultado da simulação que será apresentado, como mostra a Fig. A.62.

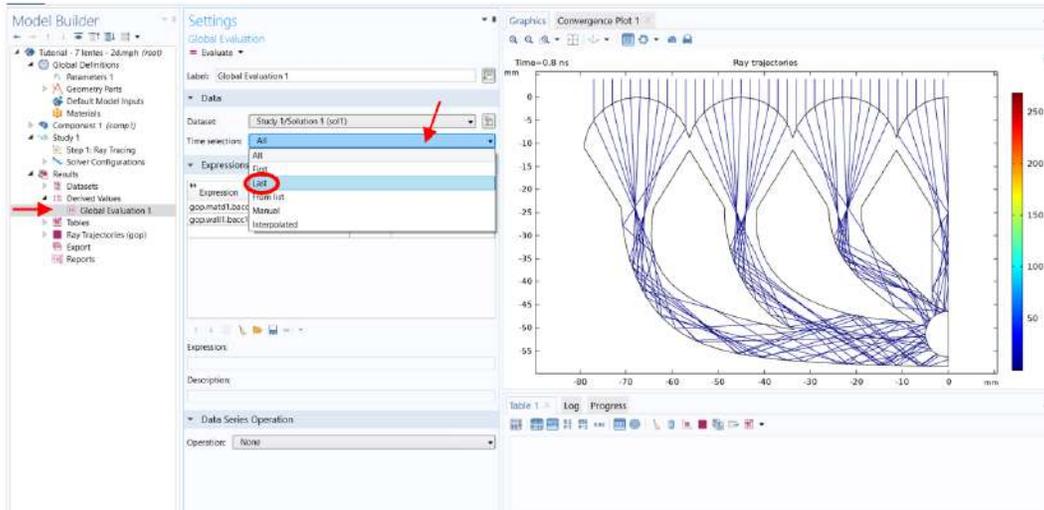


Figura A.62: Definindo o tempo do resultado como final.

Finalmente o resultado da simulação para a análise óptica. Para o consol apresentar o resultado computado basta clicar em “Evaluate” como indica a Fig. A.63. Os resultados irão aparecer em uma tabela logo abaixo do gráfico do traçado de raios.

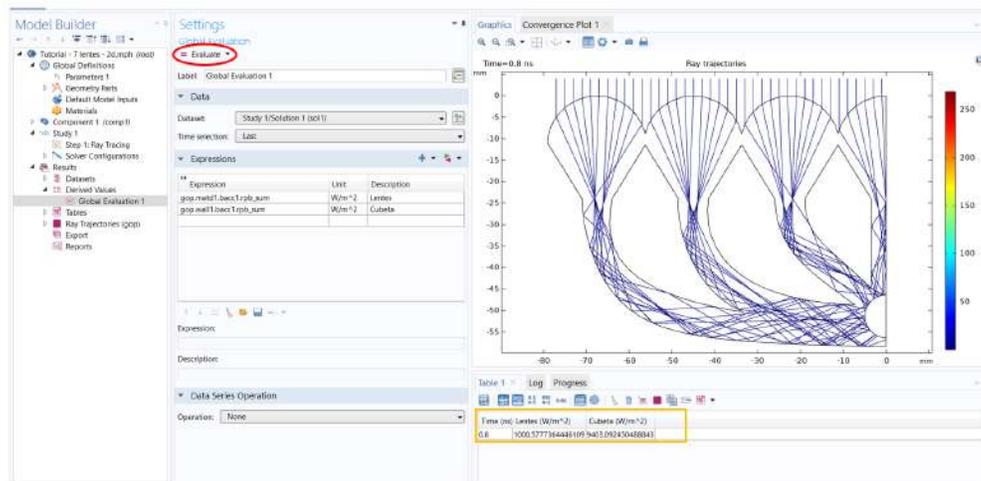


Figura A.63: Tabela com os resultados da intensidade luminosa na lente e cubeta guardados nos acumuladores.

## A.4 Estudo da absorção Solar

A partir de agora serão definidos os parâmetros para absorção solar. O estudo contará com o uso do módulo de absorção solar “*Radiative Beam in Absorbing Media*”. Inicialmente em “*Model Builder component 1(comp1)*” clique em “*Radiative Beam in Absorbing Media*” então toda a geometria selecionada em “*Graphics*”, mas como a absorção solar ocorrerá somente na cubeta tire a seleção da estrutura da geometria deixando somente o semicírculo selecionado como indica a Fig. A.64.

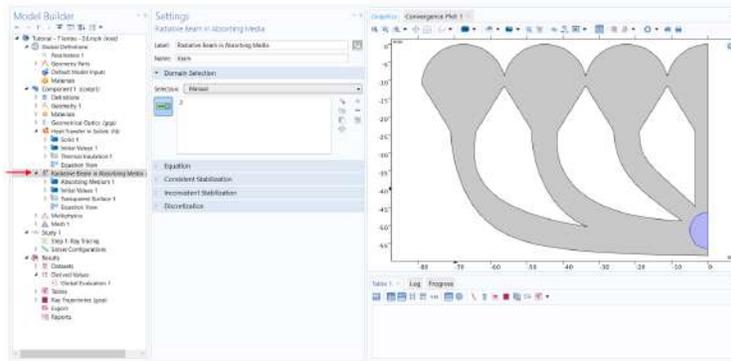


Figura A.64: Restringindo a absorção solar á agua na cubeta.

O próximo passo é definir a superfície da cubeta que recebera a luz incidente a ser absorvida. Em model builder posicione o cursor sobre “*Radiative Beam in Absorbing Media*” clique com o botão com o botão direito do mouse, selecione e clique em “*Incident Intensity*” como mostra a Fig. A.65(a). A Fig. A.65(b) mostra o layout da área de trabalho do Comsol.

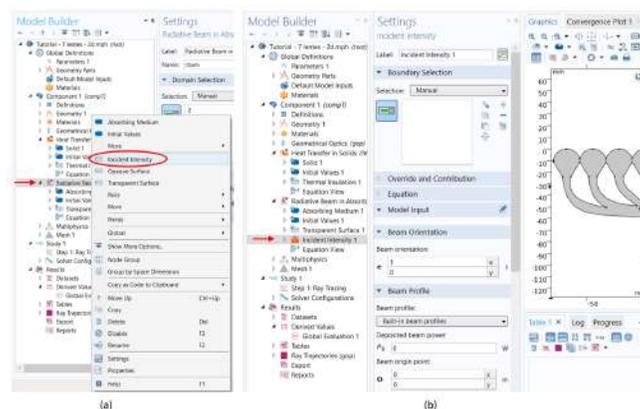


Figura A.65: Definindo a interfaces de luz incidente a ser absorvida.

O próximo passo é selecionar a interface da luz incidente, a orientação e perfil para absorção da luz. para selecionar a interface que recebe a luz clique diretamente nas partes circulares da cubeta para seleciona-las, como mostra a figura 66. Para definir o perfil de absorção em “Settings” >> “incident intensity” >> “Beam Profile” >> “Beam Profile:” clique em “built-in beam profiles” e selecione “User defined”.

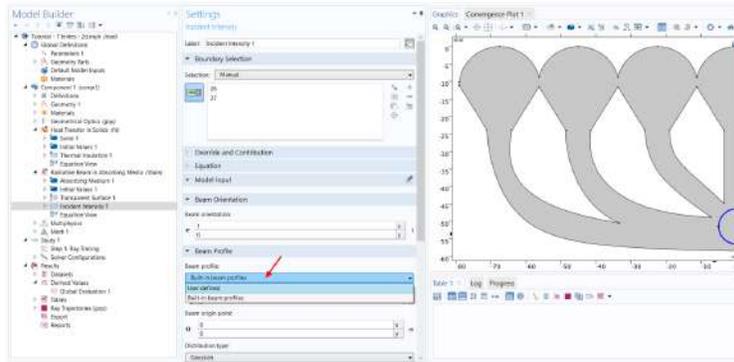


Figura A.66: Perfil de absorção definida pelo usuário.

Então agora é só definir a orientação e perfil para absorção como mostra a figura 67. A orientação para a absorção foi definida como  $x = 4$  e  $y = -1$ . No perfil de absorção deve-se inserir o nome da variável que acumula o valor da intensidade luminosa/potência que chega na cubeta definida pelo próprio consol como: *gop.wall1.bacc1.rpb\_sum*, ver na Fig. A.61(b).

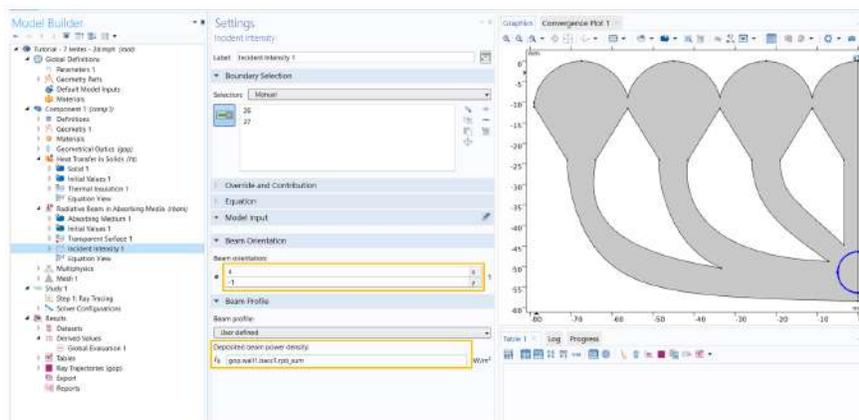


Figura A.67: Orientação para absorção da luz e intensidade da luz incidente conforme variável do acumulador da cubeta.

### A.5 Análise Térmica

o módulo de transferência de calor “*Heat Transfer in Solids (ht)*” é responsável por estudar e simular o processo aquecimento e propagação de calor no coletor solar.

Inicialmente em “*Model Builder*” >> “*Component 1 (comp1)*” clique em “*Heat Transfer in Solids (ht)*” e em “*Settings*” >> “*Heat Transfer in Solids*” >> “*Physical Model*” >> “*Reference temperature:*” que é pré-definido como 273.15[K] defina como 298 [k], conforme a Fig. A.68.

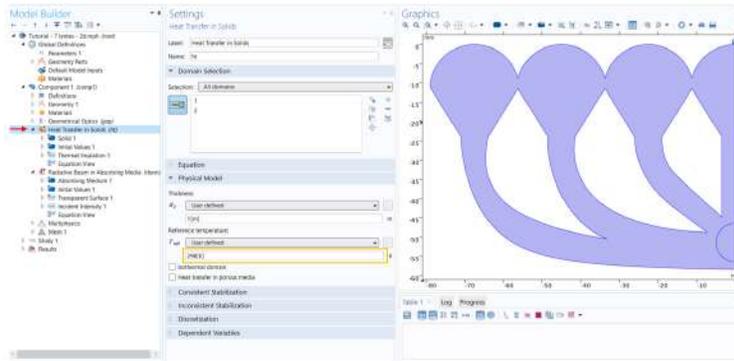


Figura A.68: Temperatura de referência para o módulo de transferência de calor.

O próximo passo é definir o domínio que corresponde ao fluido na geometria, como mostra a Fig. A.69(a). Após inserir o fluido em “*Graphics*” clique na parte que corresponde a cubeta como mostra a Fig. A.69(b).

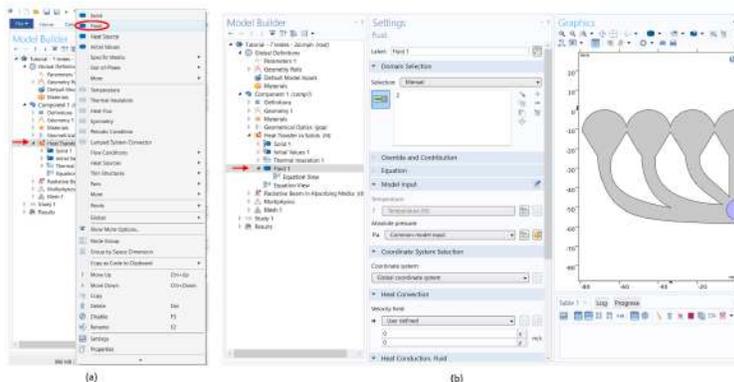


Figura A.69: Definindo o fluido no módulo de transferência de calor (a) condições do fluido (b).

Na sequência deve-se definir a fonte de calor. Clique com o botão direito sobre “Heat Transfer in Solids” em seguida selecione “Heat Source” e clique em “Boundary Heat source”, ver as Fig. A.71(a) e Fig. A.71(b).

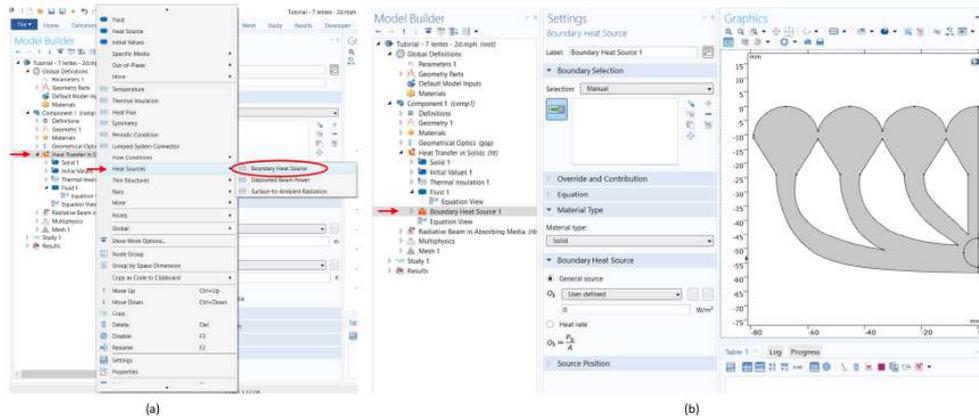


Figura A.70: Inserindo a fonte de calor (a) e condições para liberação do calor (b).

Na sequência deve-se definir a fonte de calor. Clique com o botão direito sobre “Heat Transfer in Solids” em seguida selecione “Heat Source” e clique em “Boundary Heat source”, ver as Fig. A.71(a) e Fig. A.71(b).

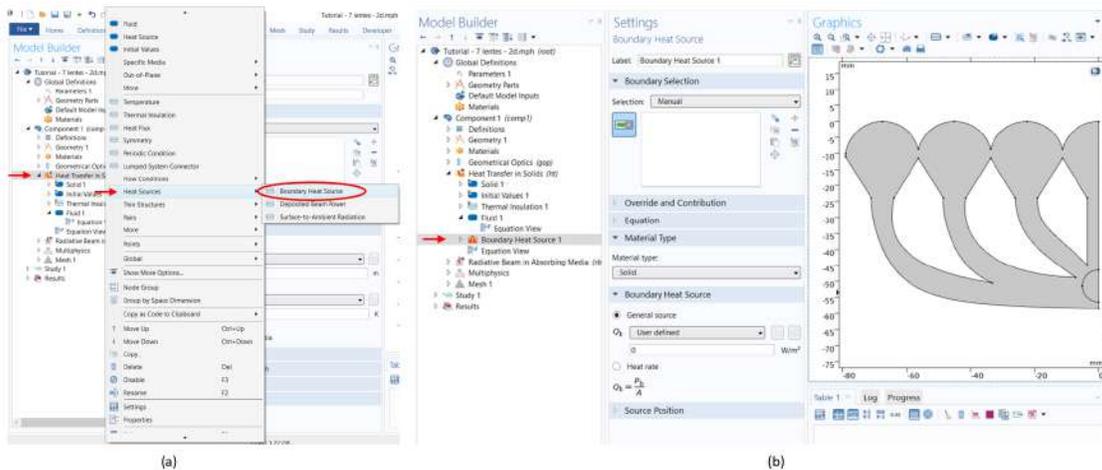


Figura A.71: Inserindo a fonte de calor (a) e condições para liberação do calor (b).

Após inserir a fonte de calor é preciso definir a variável que contabiliza a energia absorvida que é responsável pelo aquecimento do fluido. Para isso em “Model Builder” >> “Component 1 (comp1)” >> “Results” >> clique em “Derived Values” com o curso ele clique

com o botão direito do mouse na nova janela seleccione “Average” e clique **surface average**, ver na Fig. A.72(a). Em seguida, em “Graphic” clicar na cubeta conforme Fig. A.72(b).

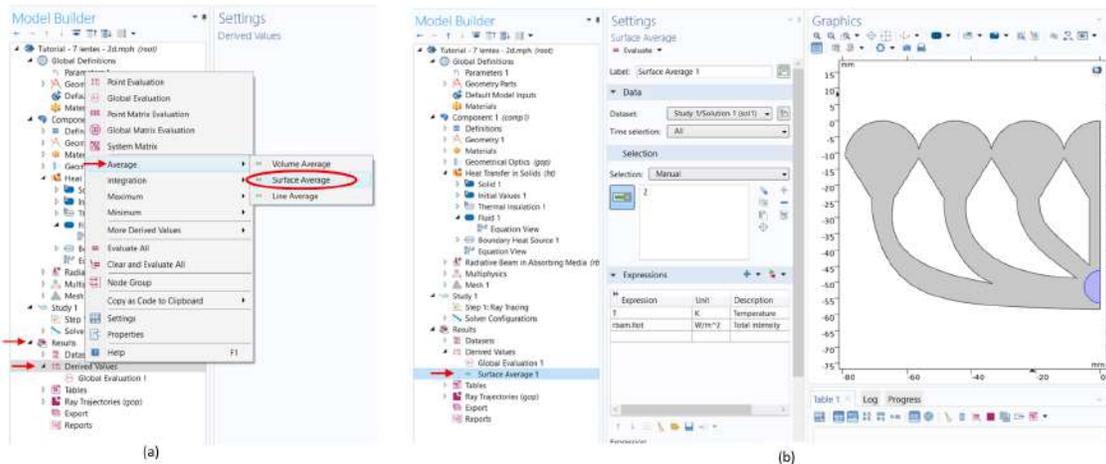


Figura A.72: Definindo a variável que avalia a quantidade de energia luminosa absorvida pela água.

Então em “Settings” >> “Surface Average” >> “Expressions” na tabela copie a variável de nome **rbam.Itot**, como mostra a Fig. A.73.

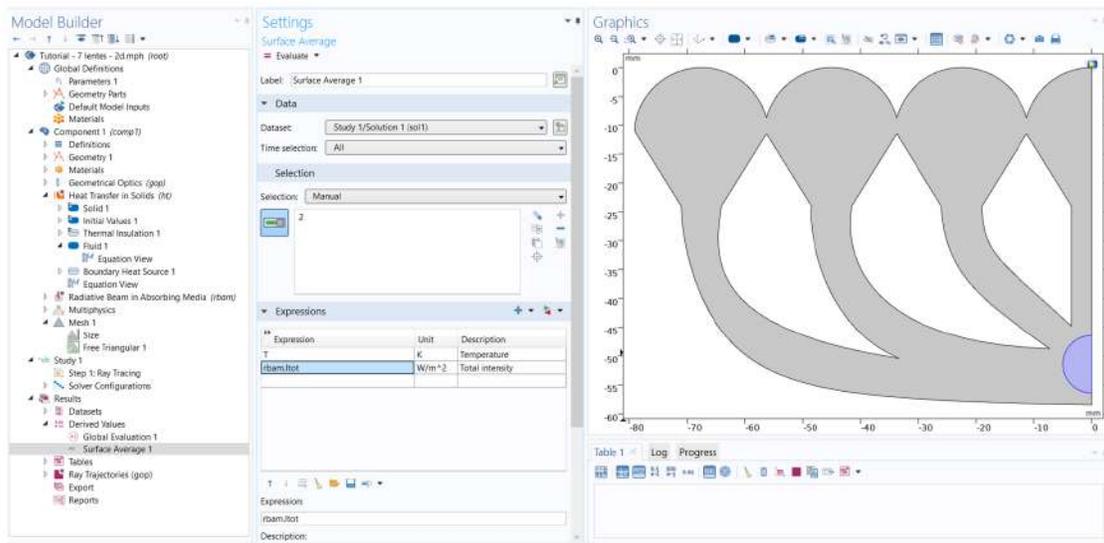


Figura A.73: Variável da absorção solar.

Finalmente é só clicar em “Boundary heat source 1” >> “Settings” >> “Boundary Heat” >> “Boundary Heat Source” em “General Source” cole o nome da variável copiada

anteriormente, conforme a Fig. A.74.

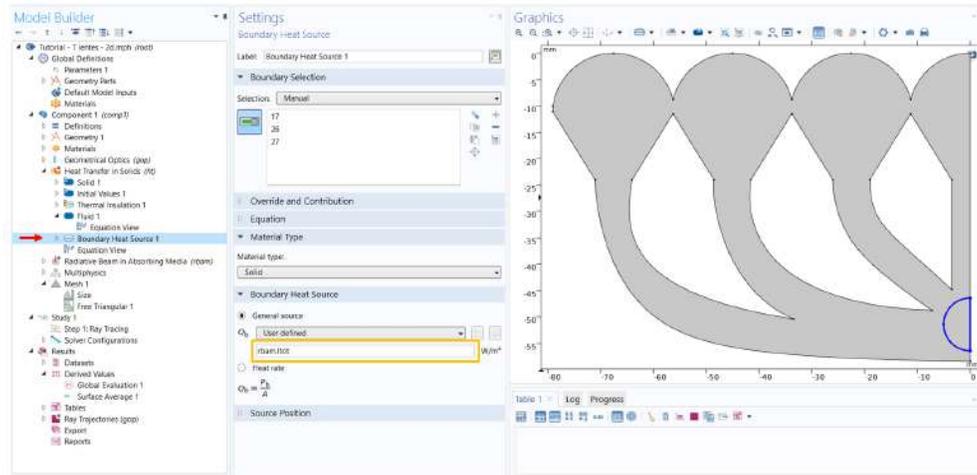


Figura A.74: Inserindo a variável da absorção solar na fonte de calor.

Agora é só inserir o fluxo de calor clicando em “Heat Transfer In Solids (ht)” e com o cursor sobre ele clique com o botão direito do mouse e na nova janela clique em “Heat Source” como a Fig. A.75(a).

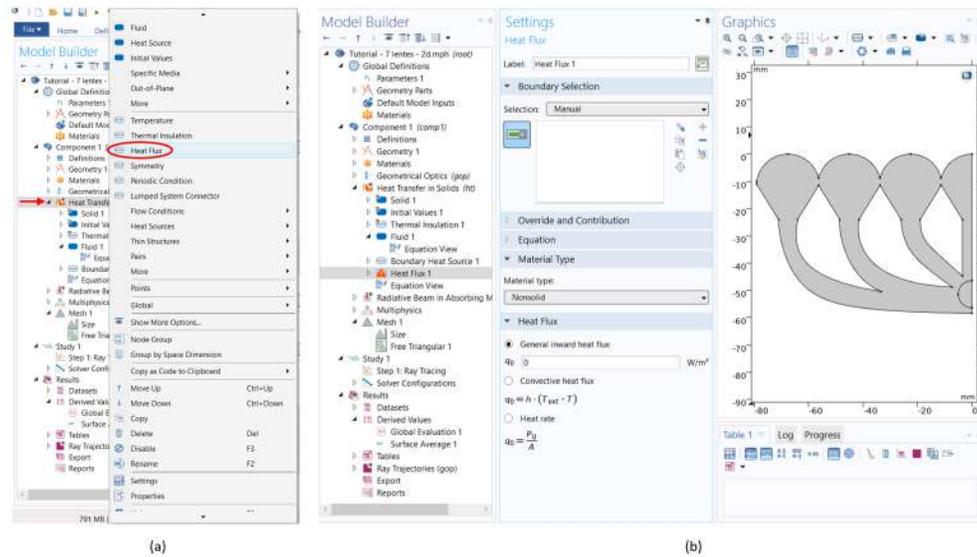


Figura A.75: Inserindo o fluxo de calor (a) e condições do fluxo de calor (b).

Então selecione a superfície superior do coletor solar. Na sequência clique em “Convective Heat Flux”, insira o valor do coeficiente de transferência de calor igual a 10 e a temperatura externa: 298 [k], como mostra a Fig. A.76.

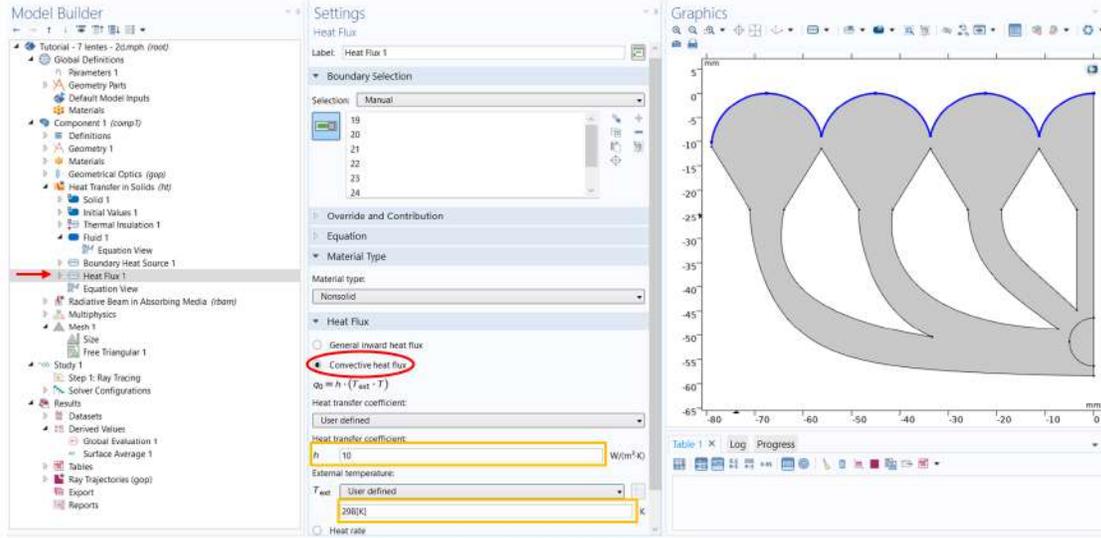


Figura A.76: Definindo o perfil do fluxo de calor.

Finalmente, clique em “*Initial Values 1*”. Então modifique o valor da temperatura inicial que está pré-definida como 293.15 [K] e digite 298 [K] para definir o novo valor de temperatura inicial.

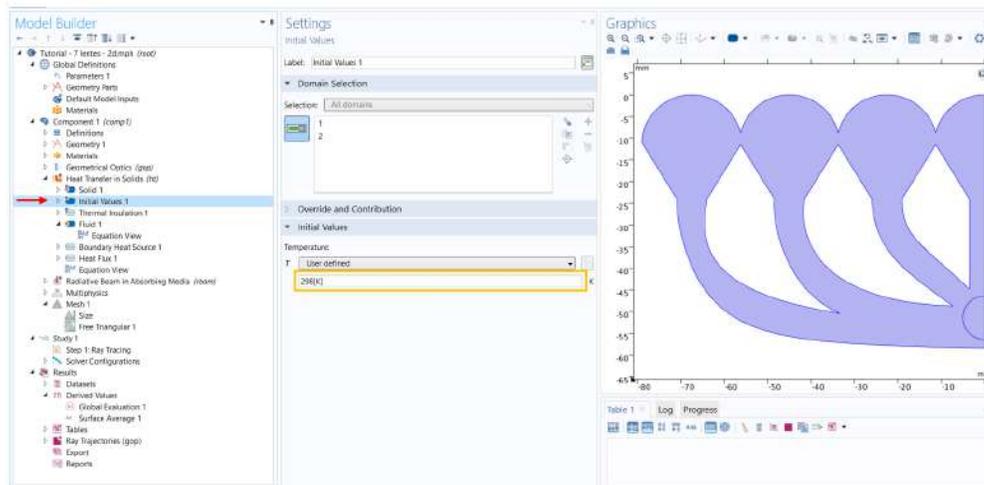


Figura A.77: Valor da temperatura em condições iniciais.

Agora é preciso inserir novo estudo para simular absorção, aquecimento e transferência de calor. Em “*Model Builder*” >> “*Component 1 (comp 1)*” clique em “*Study*” com o curso sobre ele clique com o botão direito selecione “*Study Steps*” >> “*Time Dependent*” e clique em “*Time Dependent*”. Então o novo estudo será inserido.

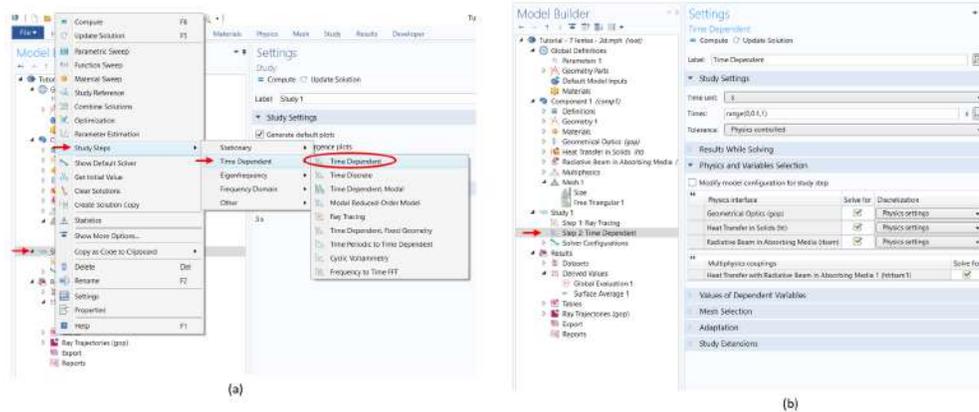


Figura A.78: Definindo novo estudo (a) para estudar a absorção e transferencia de calor (b).

Em “Settings” >> “Time Dependent” >> “Study Settings” em “time unit:” a unidade de tempo para a simulação deve ser minutos “min” e em “times” altere a unidade de tempo em “Times” para “range(0,1,40)”. Em “Physics and Variable Selections” tire a seleção de “Geometrical optics (gop)”.

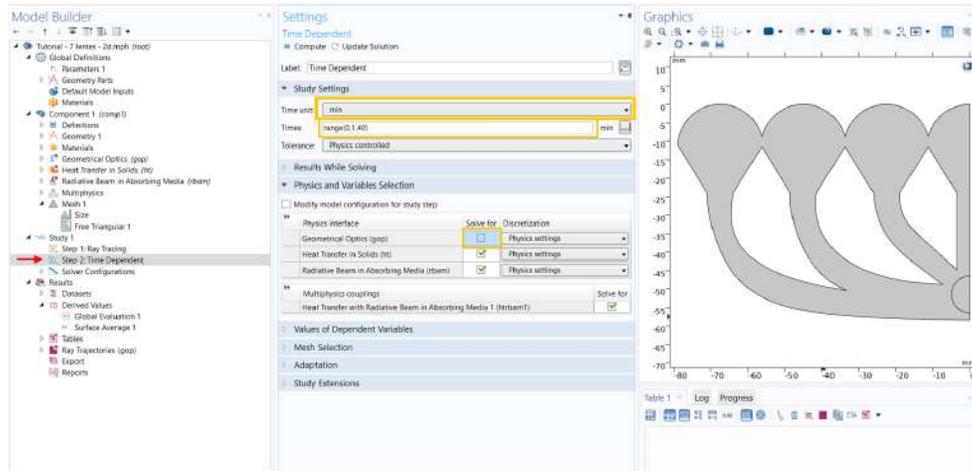


Figura A.79: Redefinindo a unidade de tempo do novo estudo e desativando o módulo de optica geometrica.

Finalmente é só executar toda a simulação.

## A.6 Resultados e Gráficos

Em *Model builder* >> *component1 (comp1)* >> *Results* >> *Derived Values* clique em *Global Evaluation 1*. Então em *Settings* >> *Global Evaluation* clique em = **Evaluate**. Dessa forma será possível ver a tabela logo abaixo de Graphics(imagem da geometria) que apresenta a intensidade da luz na interface superior da geometria e da interface da cubeta, conforme Fig. A.80.

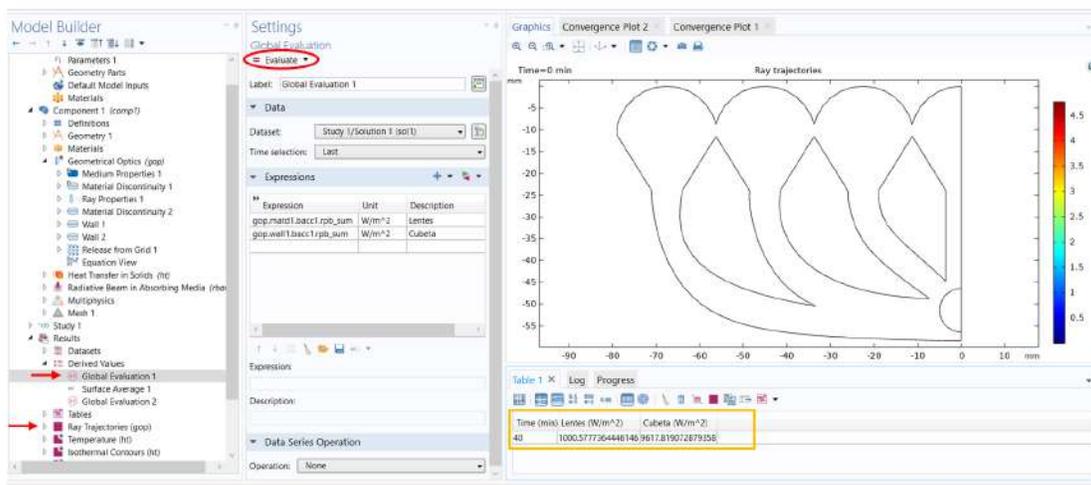


Figura A.80: Tabela de resultados da intensidade luminosa na interface da lentes e interface da cubeta.

O primeiro gráfico obtido foi o da análise óptica, ou seja, trajetória dos raios de luz. Observação: A Fig. A.81 só aparece quando se executa a simulação para o estudo 1 ao executa os dois estudos juntos o gráfico não é apresentado, pois no estudo 2 não é feito análise óptica.

Para o ver o gráfico de interesse em *Model Builder* >> *Componente1 (comp 1)* >> *Results* eles aparecem na sequencia **Ray Trajetories (gop)**, **Temperature (ht)**, **Isothermal Contours(ht)** e **Total Intensity (rbam)**. Para ver um gráfico específico é só clicar sobre o nome dele, conforme esses passos.

O segundo gráfico é o da distribuição da temperatura do concentrador solar.

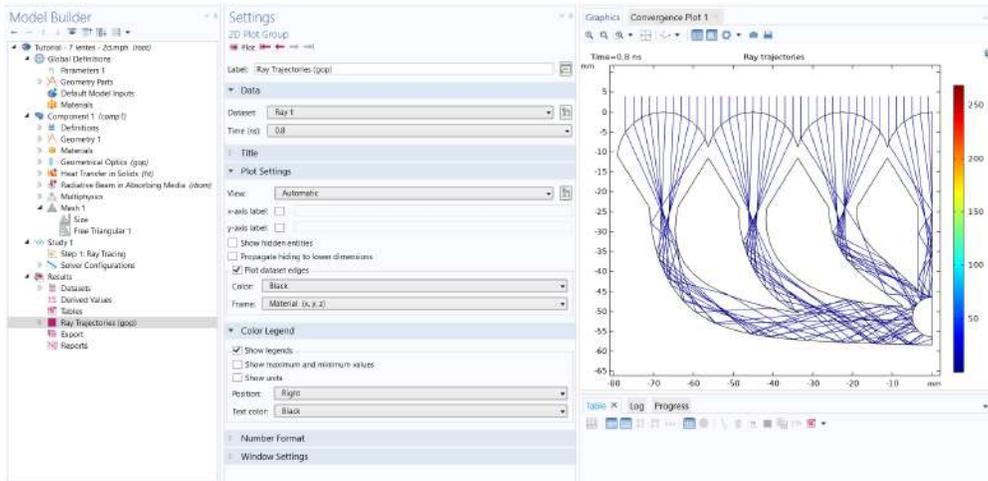


Figura A.81: Tabela de resultados da intensidade luminosa na interface da lesntes e interface da cubeta.

Para apresentar a tabela de temperatura do fluido em *Model Builder* >> *Component 1 (comp 1)* >> *Results* clique em *Derived values* com o cursor sobre ele clique com o botão direito e insira um novo *Global Evaluate*, conforme a Fig. A.82. Então em *Settings* >> *Global Evaluate* >> *Expressions* clique em (+) *Add expression*. Na nova tabela como indicam as setas da A.82 clique em **ht.bhs1.Tave - Weighted average temperature - K**.

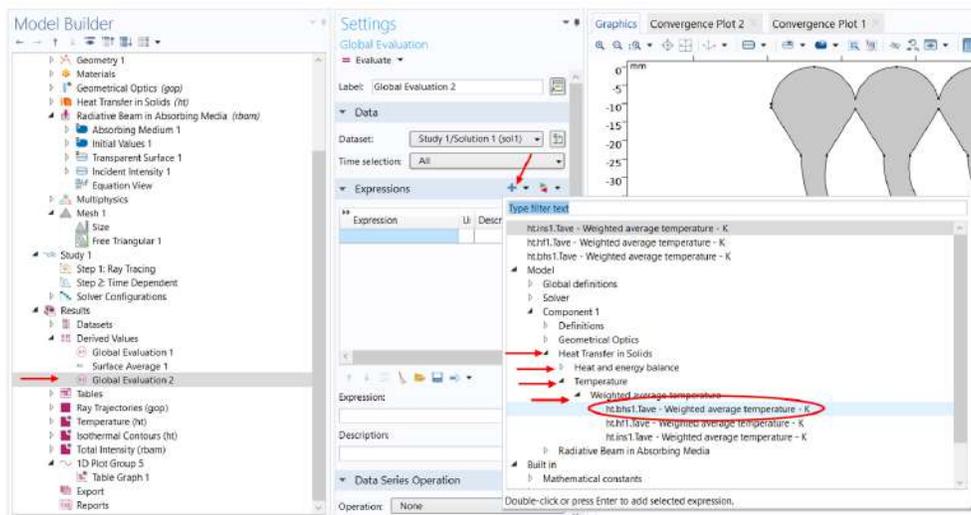


Figura A.82: Definindo a variável que apresenta os valores de temperatura em função do tempo.

Para a apresentação dos resultados na tabela em *Settings* >> *Global Evaluate 2*

clique em **Evaluate** como mostra a Fig. A.83.

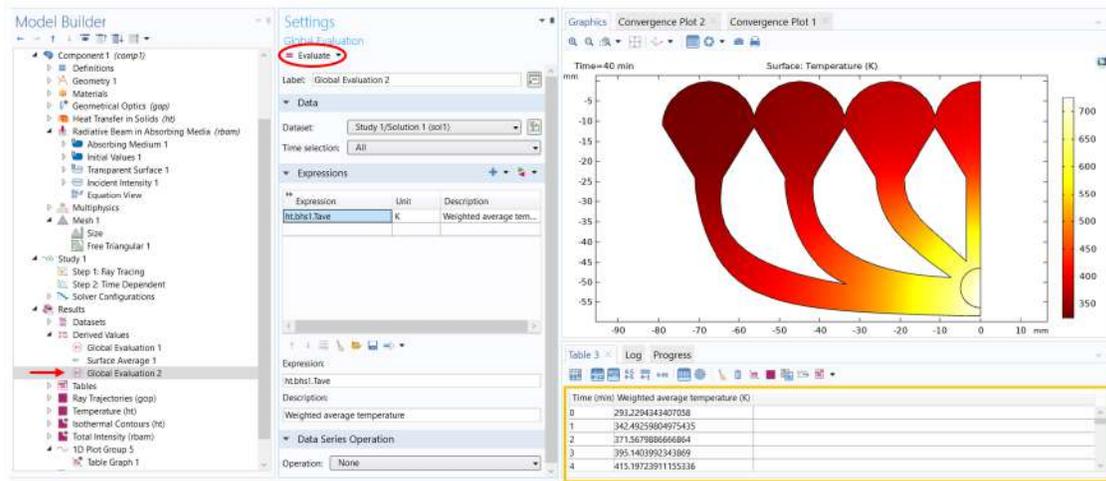


Figura A.83: Gráfico de distribuição de temperatura e tabela da temperatura x tempo.

O terceiro gráfico, mostrado na Fig. A.84, refere-se as isotermas.

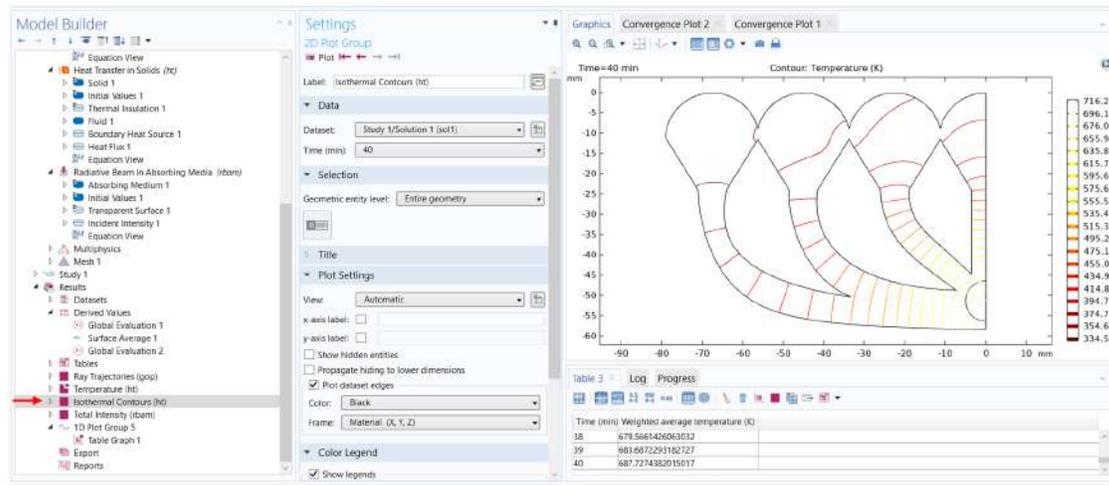


Figura A.84: Isotermas da geometria.

O quarto gráfico e último gráfico apresenta a intensidade luminosa absorvida conforme orientação da absorção da luz pré-definida.

Os gráficos também podem ser plotagem por domínios, ou seja, em parte única da geometria. Para isso clique no nome do gráfico de interesse então *Settings* >> *2D plot Group* >> *selection* >> *Geometric entity level*: clique *Entire geometry*, clique em **Domain** e clique em *graphics* clique diretamente no domínio da cubeta e finalmente em **Plot**, conforme

Fig. A.86.

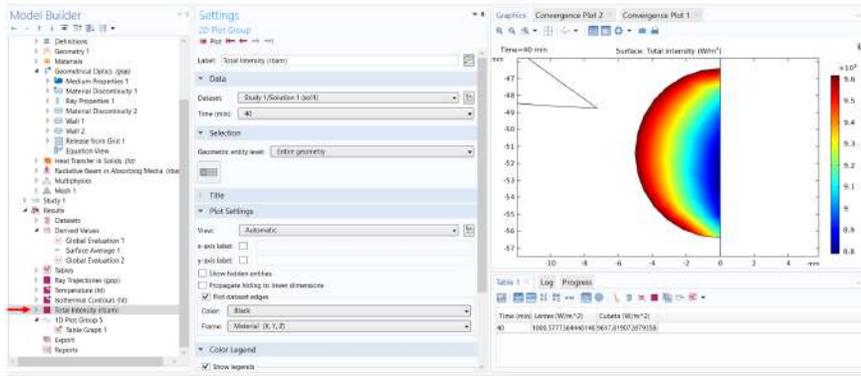


Figura A.85: Distribuição da intensidade luminosa absorvida.

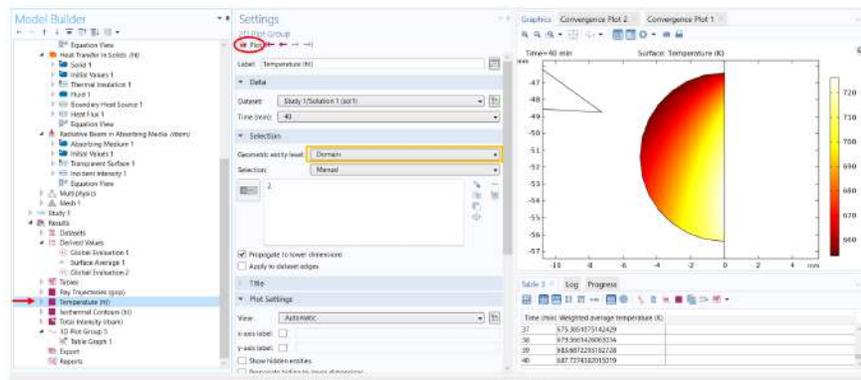


Figura A.86: Distribuição de temperatura da cubeta.

Esse procedimento pode ser feito para o gráfico de isotermas seguindo o mesmo raciocínio, ver A.87.

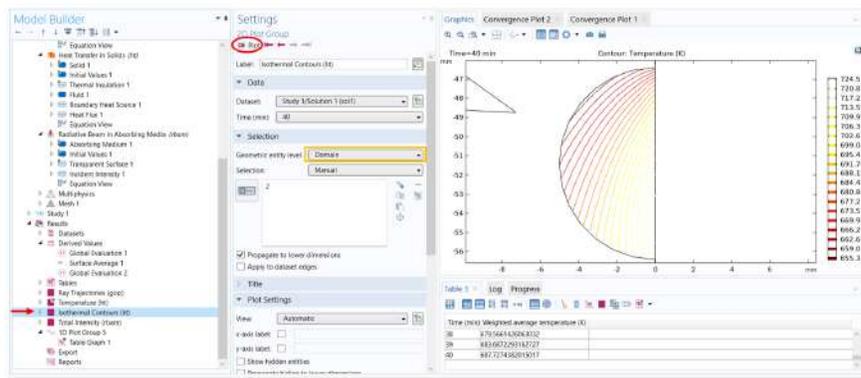


Figura A.87: Isotermas da cubeta.

---

---

# APÊNDICE B

---

## TABELAS

### Tabelas da Avaliação de Qualidade dos Artigos do Estado da Arte

Tabela B.1: Escore obtido da avaliação de qualidade dos 83 artigos selecionados sobre concentradores solares

Referência	1	2	3	4	5	6	Escore
[23]	1.0	1.0	1.0	0.5	0.0	1.0	4.5
[24]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	6,0
[25]	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	4.0
[51]	1.0	0.0	0.5	0.0	1.0	1.0	3.5
[52]	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	5.0
[18]	1.0	1.0	0.5	1.0	0.0	1.0	4.5
[53]	1.0	1.0	0.5	1.0	0.0	1.0	4.5
[54]	1.0	0.5	0.5	1.0	0.0	0.5	3.5

Continuidade da Tabela B.1							
Referência	1	2	3	4	5	6	Escore
[55]	1.0	0.0	0.0	1.0	0.5	1.0	3.5
[56]	0.5	0.5	0.5	1.0	0.5	1.0	4.0
[57]	1.0	0.5	0.0	1.0	0.0	1.0	3.5
[28]	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	5.5
[26]	1.0	1.0	0.5	1.0	0.0	0.5	4.0
[58]	1.0	0.5	1.0	1.0	0.0	1.0	4.5
[29]	1.0	1.0	0.5	0.5	0.0	0.0	3.0
[29]	1.0	0.5	0.0	1.0	0.0	1.0	3.5
[59]	1.0	0.0	0.5	1.0	0.5	1.0	4.0
[19]	1.0	0.5	0.0	1.0	0.5	1.0	4.0
[22]	1.0	0.5	0.0	0.5	1.0	0.5	3.5
[60]	1.0	0.5	0.0	0.5	1.0	1.0	4.0
[27]	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	5.0
[61]	1.0	0.5	1.0	1.0	0.5	0.0	4.0
[48]	1.0	0.0	0.5	1.0	0.5	1.0	4.0
[62]	1.0	0.5	0.0	0.0	1.0	1.0	3.5
[63]	1.0	0.5	0.0	1.0	0.5	1.0	4.0
[21]	1.0	0.0	0.0	0.5	1.0	1.0	3.5
[20]	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	3.0
[64]	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	5.0
[65]	0.0	1.0	0.5	0.5	0.5	1.0	3.5
[66]	1.0	0.5	0.0	1.0	1.0	1.0	4.5
[11]	1.0	0.5	0.0	0.5	0.5	1.0	3.5
[12]	1.0	0.0	1.0	1.0	0.5	1.0	4.5
[67]	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	3.0
[68]	1.0	0.5	0.0	0.5	0.5	0.5	3.0

Continuidade da Tabela B.1							
Referência	1	2	3	4	5	6	Escore
[13]	1.0	0.5	0.0	1.0	1.0	0.5	4.0
[69]	1.0	0.5	0.5	0.5	0.0	1.0	3.5
[70]	1.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	4.0
[71]	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	3.0
[72]	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	3.0
[73]	1.0	0.5	1.0	1.0	0.5	0.5	4.5
[74]	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	5.0
[53]	1.0	1.0	0.0	0.5	1.0	1.0	4.5
[75]	0.5	0.5	0.0	1.0	0.0	1.0	3.0
[76]	1.0	0.5	0.0	0.0	0.5	1.0	3.0
[77]	1.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	3.0
[78]	1.0	1.0	0.0	0.5	1.0	0.5	4.0
[79]	1.0	0.5	0.0	0.5	0.5	1.0	3.5
[80]	1.0	0.0	0.5	1.0	1.0	1.0	4.5
[81]	1.0	1.0	0.0	0.5	1.0	1.0	4.5
[82]	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	3.0
[83]	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	4.0
[84]	0.5	0.0	0.0	1.0	0.5	1.0	3.0
[85]	0.5	0.5	0.0	1.0	1.0	1.0	4.0
[86]	1.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	4.0
[31]	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	1.0	5.5
[87]	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	1.0	5.5
[88]	1.0	0.0	0.0	0.5	1.0	1.0	3.5
[89]	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	3.0
[90]	1.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	3.0

Continuidade da Tabela B.1							
Referência	1	2	3	4	5	6	Escore
[91]	1.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.5	3.5
[92]	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	0.5	5.0
[93]	1.0	1.0	0.0	0.5	1.0	1.0	4.5
[94]	0.5	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	4.5
[95]	0.5	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	4.5
[96]	1.0	1.0	0.0	0.5	1.0	0.5	4.0
[97]	1.0	0.5	0.0	0.5	1.0	0.5	4.0
[98]	1.0	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	5,0
[99]	1.0	0.5	0.0	1.0	0.0	1.0	3.5
[100]	1.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	3.0
[101]	1.0	0.5	0.0	1.0	0.0	0.5	3.0
[102]	0.5	1.0	0.0	0.5	0.5	1.0	3.5
[14]	1.0	1.0	0.5	1.0	0.0	0.0	3.5
[103]	1.0	1.0	0.0	0.5	0.5	1.0	4.0
[104]	1.0	0.5	0.0	0.5	1.0	0.5	3.5
[105]	1.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	3.0
[106]	1.0	1.0	0.0	0.5	0.0	1.0	3.5
[107]	1.0	0.5	0.0	1.0	0.0	1.0	3.5
[108]	1.0	0.5	0.0	1.0	0.0	0.5	3.0
[37]	1.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.5	3.5
[109]	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	3.0
[110]	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	3.0
[111]	0.5	0.5	0.0	1.0	1.0	1.0	4.0
[112]	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	5.0

Tabela B.2: Escores obtidos na avaliação de qualidade dos 25 artigos selecionados sobre guia de ondas

<b>Referência</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>Escore</b>
[113]	0.5	1.0	0.0	0.5	1.0	1.0	4.0
[15]	1.0	1.0	0.5	1.0	0.5	1.0	5.0
[45]	1.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.5	3.5
[47]	0.0	1.0	0.0	1.0	0.5	0.5	3.0
[34]	0.5	1.0	0.0	1.0	0.5	0.0	3.0
[16]	0.5	1.0	0.0	1.0	0.5	0.0	3.0
[114]	1.0	0.0	0.0	0.5	0.5	1.0	3.0
[115]	1.0	0.0	0.0	0.5	0.5	1.0	3.0
[116]	1.0	0.5	0.0	1.0	0.0	0.0	2.5
[117]	1.0	0.5	0.0	0.0	0.5	1.0	3.0
[118]	1.0	1.0	0.0	0.5	0.0	1.0	3.5
[46]	1.0	1.0	0.0	0.5	0.5	0.5	3.5
[119]	1.0	1.0	0.0	0.0	0.5	0.5	3.0
[120]	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.5	2.5
[121]	1.0	0.0	0.5	1.0	0.0	0.5	3.0
[122]	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.5	2.5
[17]	1.0	0.5	0.0	1.0	0.0	0.5	3.0
[123]	1.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.5	3.5
[3]	1.0	0.5	0.0	0.0	0.5	1.0	3.0
[6]	1.0	0.5	0.0	0.5	0.5	0.5	3.0
[124]	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0	3.0