

Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

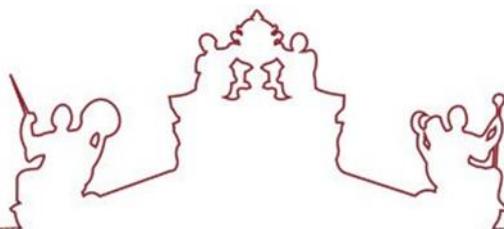
Dissertação

**Aplicação e simulação de óticas SMS a concentradores
solares do tipo torre com abordagem beam-down**

Henry Alexandre Lopes Borges

Orientador(es) | Diogo Canhão de Sousa Canavarro

Évora 2020



Universidade de Évora - Escola de Ciências e Tecnologia

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

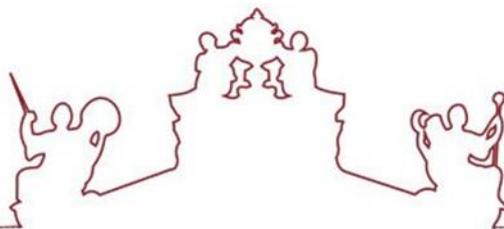
Dissertação

**Aplicação e simulação de óticas SMS a concentradores
solares do tipo torre com abordagem beam-down**

Henry Alexandre Lopes Borges

Orientador(es) | Diogo Canhão de Sousa Canavarro

Évora 2020



A dissertação foi objeto de apreciação e discussão pública pelo seguinte júri nomeado pelo Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia:

Presidente | Isabel Maria Málico (Universidade de Évora)

Vogais | Diogo Canavarro (Universidade de Évora) (Orientador)

Paulo Canhoto (Universidade de Évora) (Arguente)

Évora 2020

Resumo

As tecnologias do tipo Central Tower Receiver (CTR) são hoje já bastante utilizadas na produção de eletricidade por via térmica, com fatores de concentração acima de 1000X ($1X = 1\text{kW/m}^2$). Em particular, a abordagem beam-down releva-se muito promissora pela possibilidade de colocação da cavidade absorvedora perto do plano horizontal, facilitando a operação da mesma. Neste trabalho será feita uma análise deste tipo de soluções e, em particular, a aplicação de concentradores do tipo SMS a óticas terciárias para a obtenção de elevados níveis de concentração incluindo *gaps* entre os espelhos para evitar pontes térmicas. Serão realizados análises comparativos entre soluções correntes e as novas abordagens, através de uma metodologia de comparação dos parâmetros óticos como a eficiência ótica, CAP, e curvas de transmissão angular de cada sistema. Da análise desses resultados, comprova-se ser possível atingir eficiências óticas de 68% e perdas de eficiência de 4% incluindo *gap* a óticas terciárias.

Palavras-chave: Concentração de Energia Solar; Central de Torre; Beam-Down; Simultaneous Multiple Surface; Etendue.

Abstract

Application and simulation of SMS optics to tower-type solar concentrators with beam-down approach.

Central Tower Receiver (CTR) technologies are now widely used in the production of electricity by thermal means, with concentration factors above 1000X ($1X = 1\text{kW}/\text{m}^2$). In particular, the beam-down approach is very promising due to the possibility of placing the absorbing cavity close to the horizontal plane, facilitating its operation. In this work will be made an analysis of this type of solutions and, in particular, the application of concentrators type SMS to tertiary optics to obtain high levels of concentration including *gaps* between mirrors to avoid thermal short-circuits. Comparative studies will be carried out between current solutions and new approaches, through a methodology for comparing optical parameters such as optical efficiency, CAP, and angular transmission curves of each system. From the analysis of these results, it is proved that it is possible to achieve optical efficiencies of 68% and efficiency losses of 4% including a gap at tertiary optics.

Keywords: Concentrated Solar Power; Central Tower Receiver; Beam-Down; Simultaneous Multiple Surface; Etendue

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu agradecimento a todos os que direta ou indiretamente apoiaram ou contribuíram para a elaboração desta dissertação.

Em particular quero agradecer ao meu orientador Professor Doutor Diogo Canhão de Sousa Canavarro que sempre se mostrou disponível para ajudar e por todo o tempo despendido, compreensão, grande conhecimento e a enorme paciência que teve durante toda a dissertação, que sem o seu grande apoio essa dissertação não era possível.

Gostaria ainda de agradecer aos meus pais, Inácio Lopes Borges e Teresa Lopes Tavares, por toda a força e motivação e por todo o esforço e sacrifício que tornaram possível a realização deste curso, assim como à minha restante família pelo apoio e encorajamento.

Conteúdo

Resumo	i
Abstract.....	iii
Agradecimentos	v
Conteúdo.....	vii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas	xi
Nomenclatura.....	xii
Símbolos Gregos	xiii
Publicações relacionadas com a dissertação	xv
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação e Objetivos	4
1.2 Organização da dissertação.....	4
2 Fundamentos Teóricos.....	5
2.1 Concentração solar	5
2.2.1 Limite de concentração.....	5
2.1.1. Relação entre Temperatura e concentração	7
2.1.2. Eficiência instantânea de um coletor solar	8
2.1.3. Modificador de ângulo de incidência	10
2.1.4. Ângulo de aceitação.....	11
2.1.5. Produto concentração-aceitação (CAP).....	11
2.2 Ótica geométrica	12
2.2.1 Conceito de Etendue.....	14
2.2.1.1 Conservação de etendue.....	15
2.2.1.2 Concentração máxima.....	16
2.2.1.3 Princípio das cordas de Hottel	18
3 Concentrador CTR com abordagem beam-down.....	19
3.1 Sistema de concentração	19

3.2	Dimensionamento do sistema de concentração	20
3.2.1	Etendue-coupling	20
3.3	Desenhos conceptuais dos componentes óticos	22
3.3.1	Desenho da ótica do primário e secundário	22
3.3.2	Desenho da ótica do terceário	25
3.4	Simulação da performance ótico do concentrador.....	30
3.4.1	Tonatiuh	30
3.4.2	Resultados da simulação	31
4	Concentrador SMS com <i>gap</i> e sem perdas óticas	34
4.1	Desenho da ótica XX SMS em 2D	34
4.2	Simulação da ótica XX SMS	41
4.2.1	Resultado da simulação da ótica XX SMS em 2D	41
4.2.2	Resultados da simulação da ótica XX SMS em 3D.....	42
5	Análise da ótica XX SMS no concentrador CPC	45
5.1	Desenho do concentrador CPC com uma ótica XX SMS.....	45
5.1.1	Resultados da simulação da ótica em 2D	48
5.1.2	Resultados da ótica em 3D	49
5.2	Utilização do CPC com <i>gap</i> em sistemas CTR com abordagem beam-down como ótica terciária	51
5.2.1	Simulação da performance ótica.....	52
6	Conclusões e perspectivas de melhoramento	54
6.1	Conclusões	54
6.2	Perspetivas futuras	55
	Referências	56

Lista de Figuras

Figura 1.1: As quatro principais tecnologias CSP [4].	2
Figura 1.2: Um CTR com abordagem beam-down e respetiva representação esquemática [6].	2
Figura 1.3: Concentrador CPC desenhado para uma aceitação de 2θ . a) Não existindo <i>gap</i> entre os espelhos e o recetor, toda a luz que incide à entrada do coletor dentro do ângulo 2θ é capturada. b) Se existir um <i>gap</i> entre os espelhos e o recetor existirá perda de luz pelo mesmo, baixando a eficiência do sistema.	3
Figura 2.1: Sistema de concentração solar.	5
Figura 2.2: Vista superior de um sistema linear.	6
Figura 2.3: Representação da curva de transmissão/eficiência, $\eta(\theta_i)$ [2].	11
Figura 2.4: Reflexão e refração da luz num meio transparente[9].	12
Figura 2.5: Caminho ótico entre dois pontos A e B.	13
Figura 2.6: Definição de frente de ondas.	13
Figura 2.7: Representação do “espaço físico” ($dA\cos\theta$) e do “espaço angular” ($d\Omega$).	14
Figura 2.8: Definição da radiância na geometria 3D (a) e 2D (b) [2].	15
Figura 2.9: Transferência de radiação entre as superfícies $dA1$ e $dA2$.	15
Figura 2.10: Sistema ótico de concentração. A entrada <i>ain</i> é iluminada por um feixe radiativo dentro de um ângulo sólido $\pm\theta_{in}$. No caso ideal, a saída <i>aout</i> emite luz dentro do ângulo $\pm\pi/2$.	17
Figura 2.11: <i>Etendue</i> trocado entre as superfícies $R1R2$ e $P1P2$.	18
Figura 3.1: Representação esquemática do concentrador CTR com abordagem beam-down.	19
Figura 3.2: Processo de concepção de um concentrador CTR com abordagem beam-down.	23
Figura 3.3: Otimização do ponto focal do espelho secundário, para apenas um helióstato. Os raios extremos não estão perfeitamente acoplados nas extremidades devido à aproximação aplanática.	24
Figura 3.4: Desenho da ótica terciária CEC.	26
Figura 3.5: Concentrador CTR com abordagem beam down com a ótica terciária CEC.	27

Figura 3.6: As linhas de fluxo que ligam S1S2 e R1R2 são hipérbolas.....	28
Figura 3.7: Secção transversal do concentrador CTR com abordagem beam-down utilizando uma lente Fresnel e um trompete como ótica terciária.	29
Figura 3.8: Concentrador CTR com abordagem beam down utilizando uma lente Fresnel e um Trompete como ótica terciária.	29
Figura 3.9: Erro relativo de Tonatiuh [17].....	30
Figura 3.10: Exemplo de um traçado de raios numa ótica CTR com abordagem beam-down. a) visão geral e b) detalhes dos raios que entram no concentrador terciário.	31
Figura 4.1: Sistema ótico de concentração. Com abertura de entrada <i>P</i> e abertura de saída <i>R</i>	35
Figura 4.2: Raios extremos e frentes de ondas no desenho de ótica XX SMS.....	36
Figura 4.3: Condições iniciais da ótica XX SMS.....	37
Figura 4.4: Primeira “cadeia” da ótica XX SMS.....	38
Figura 4.5: Computando as várias “cadeias”, o desenho final da ótica XX SMS é obtido. A parte superior da ótica termina no ponto P4, certificando que o recetor está iluminado entre $\pm\pi/2$	39
Figura 4.6: Condições finais da ótica XX SMS em 2D.....	40
Figura 4.7: Curvas de transmissão para diferentes concentradores XX SMS em 2D, projetados para ângulos de 10°, 20°,40° e 60°.	41
Figura 4.8: Concentrador XX SMS em 3D obtido por simetria de rotação.	42
Figura 4.9: Curvas de transmissão para diferentes concentradores XX SMS em 3D, projetados para ângulos de 10°, 20°,40° e 60°.....	43
Figura 5.1: Processo de conceção do CPC com uma ótica XX SMS para gerir perdas de <i>gap</i>	46
Figura 5.2: Forma final do CPC com uma ótica XX SMS para controlo de perdas de <i>gap</i>	47
Figura 5.3: Curvas de transmissão para diferentes concentradores CPC XX SMS em 2D, projetados para ângulos de 10°, 20°,40° e 60°.	48
Figura 5.4: Simulação da ótica CPC XX SMS em 3D no Tonatiuh.....	49
Figura 5.5: Curvas de transmissão para diferentes concentradores CPC XX SMS em 3D, projetados para ângulos de 10°, 20°,40° e 60°.	50

Figura 5.6: Concentrador CTR com abordagem beam down com a ótica terciária CPC
XX SMS..... 52

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Dados geométricos dos concentradores CTR com abordagem beam-down, com suas respectivas óticas terciárias.....	31
Tabela 3.2: Desempenho ótico das óticas CEC e Trompete + lente Fresnel, como terciárias no concentrador CTR com abordagem beam down.....	32
Tabela 4.1: Comparação da perda de concentração entre os concentradores 3D XX SMS e 3D CPC.....	43
Tabela 5.1: Desempenho ótico das óticas CPC e CPC <i>gap</i> , como terciárias no concentrador CTR com abordagem beam down.	53

Nomenclatura

A	Área	$[m^2]$
a_{in}	Abertura de entrada do sistema ótico	$[m]$
a_{min}	Abertura mínima do sistema ótico	$[m]$
a_{out}	Abertura de saída do sistema ótico	$[m]$
A_a	Área de abertura do concentrador	$[m^2]$
A_r	Área recetora do concentrador	$[m^2]$
b_0	Parâmetro de ajuste para coletores com cobertura de vidro plana	$[-]$
d	Distância do corpo negro cilíndrico a concentrador	$[m]$
C	Concentração geométrica	$[-]$
$C_{max,2D}$	Concentração máxima para um concentrador bidimensional	$[-]$
$C_{max,3D}$	Concentração máxima para concentrador tridimensional	$[-]$
C_{3D}	Concentração do concentrador tridimensional	$[-]$
d_{S-T}	Distância do Sol-Terra	$[m]$
F	Fator de eficiência do coletor	$[-]$
I_C	Irradiação solar incidente no coletor	$[Wh/m^2]$
$K(\theta_i)$	Modificador de ângulo de incidência para o ângulo θ_i	$[-]$
L	Radiância	$[W/m^2 sr]$
L^*	Radiância base	$[W/m^2 sr]$
n	Índice de refração	$[-]$
n_{in}	Índice de refração na entrada do sistema ótico	$[-]$
n_{out}	Índice de refração na saída do sistema ótico	$[-]$
Q_r	Potência absorvida pelo recetor	$[W]$
$Q_{r,ext}$	Potência extraída	$[W]$
$Q_{r,per}$	Potência perdida pelo recetor	$[W]$
r	Raio do corpo negro cilíndrico	$[m]$
r_S	Raio do sol	$[m]$
S	Comprimento do caminho ótico	$[m]$
T	Temperatura	$[^\circ C]$
T_{amb}	Temperatura ambiente	$[^\circ C]$

T_f	Temperatura media do fluido	[°C]
T_{in}	Temperatura de entrada no coletor	[°C]
T_{out}	Temperatura de saída no coletor	[°C]
T_r	Temperatura do recetor	[°C]
T_S	Temperatura do sol	[°C]
U	Coeficiente global de perdas térmicas	[W/m ² °C]
U_{in}	<i>Etendue</i> na entrada do sistema ótico	[-]
U_{out}	<i>Etendue</i> na saída do sistema ótico	[-]
U_{2D}	<i>Etendue</i> do sistema ótico bidimensional	[-]
U_{3D}	<i>Etendue</i> do sistema ótico tridimensional	[-]

Símbolos Gregos

ϵ	Emitância	[]
η	Eficiência instantânea de um coletor solar	[%]
η_0	Eficiência ótica	[%]
η_{opt}	Eficiência ótica na incidência normal	[%]
θ	Ângulo de aceitação ou ângulo teórico	[°]
θ_i	Ângulo de incidência	[°]
θ_{in}	Ângulo de semiabertura na entrada do sistema ótico	[°]
θ_r	Ângulo de reflexão	[°]
θ_t	Ângulo de refração	[°]
θ_{out}	Ângulo de semiabertura na saída do sistema ótico	[°]
θ_R	Ângulo para o qual a eficiência do concentrador cai para 90% do seu máximo	[°]
θ_S	Ângulo de semiabertura do cone solar	[°]
θ_z	Ângulo de incidência dos raios solares na horizontal	[°]
μ	Absortância	[-]
σ	Constante de Stephan-Boltzmann	[W/m ² °C ⁴]
τ	Transmitância	[-]
Φ_a	Radiação incidente na abertura do concentrador	[W]

Φ_r	Radiação incidente no recetor do concentrador	[W]
Φ_s	Radiação emitida pelo sol	[W]
Φ_U	Radiação emitida pelo corpo negro (S_R)	[W]

Publicações relacionadas com a dissertação

I. Canavarro, D., Chaves, J., Borges, H., Santos, A., Collares-Pereira, M., “Simultaneous Multiple Surface concentrators for large acceptance angles and gap losses control”, Submetido a revista Applied Optics.

Capítulo 1

1 Introdução

A transição energética é hoje uma das questões centrais no mundo moderno. De facto, o esgotamento dos recursos energéticos convencionais, poluentes e não-renováveis (petróleo, carvão, gás natural, etc.) associados a um enorme crescimento do consumo de energia à escala mundial, está a conduzir, de muitas formas diferentes, a uma situação insustentável, ou seja, a um crescimento perigoso e incontrolável dos desequilíbrios dos ecossistemas. Estes desequilíbrios refletem-se, na prática, na poluição irreversível do solo e da atmosfera, no aumento continuado do custo energético, etc. É neste cenário difícil que as Energias Renováveis aparecem como uma verdadeira opção alternativa, uma vez que são inesgotáveis à nossa escala temporal, não-poluentes e naturalmente distribuídas pelo Mundo (embora não de forma uniforme).

Entre todas as energias renováveis, a Energia Solar surge como uma das possibilidades de maior interesse devido ao seu grande potencial e versatilidade, em particular pelo vasto campo de possíveis aplicações: água quente doméstica, calor de processo industrial, desalinização, arrefecimento solar, produção de eletricidade por via térmica e fotovoltaica, etc. Em particular, as tecnologias de Concentração de Energia Solar (CSP – *Concentrated Solar Power*, em inglês), também conhecidas como Tecnologias de Concentração Térmica Solar (CST – *Concentrated Solar Thermal*, em inglês), é uma das mais interessantes e promissoras aplicações. Estes tipos de soluções são muito interessantes não só para a possibilidade de produção de eletricidade em larga escala, mas também pela possibilidade do armazenamento de energia térmica permitindo, desta forma, o aumento da despachabilidade da eletricidade produzida pelo sistema. Esta despachabilidade é importante para uma resposta rápida e eficiente às necessidades da rede elétrica, mas também para mitigar o impacto causado pela variabilidade do recurso solar.

Atualmente, existem quatro principais tecnologias comercialmente disponíveis para concentrar a radiação solar direta, em que esta radiação será transformada em energia térmica e/ou eléctrica. Duas destas tecnologias de concentração solar são tecnologias de foco linear (*line-focus*, em inglês) e as outras duas são tecnologias de foco pontual (*point-focus*, em inglês). Todos eles são tecnologias baseadas em óticas *imaging*, mas podem ser combinados com refletores secundários *non-imaging* para aumentar ainda mais a concentração que eles podem alcançar [1]–[3]. As quatro das tecnologias propostas são: Linear Fresnel (*Linear Fresnel Reflector* - LFR), cilindro-parabólico (*Parabolic Through* - PT), Central de Torre (*Central Tower Receiver* - CTR) e disco parabólico (*Stirling Dish* - SD), como se mostra na Figura 1.1.

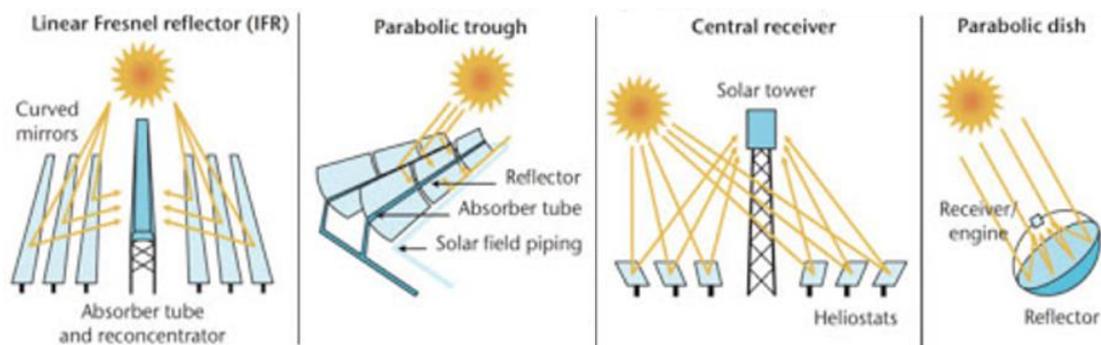


Figura 1.1: As quatro principais tecnologias CSP [4].

Os concentradores CTR pertencem aos chamados sistemas de foco pontual ou 3D, com um fator de concentração muito maior do que os sistemas de foco linear ou 2D. De facto, a concentração máxima possível para sistemas 3D é de cerca de 45300X [1]. Na prática, estes sistemas têm um fator de concentração muito menor para serem capazes de acomodar vários erros óticos, como tolerâncias de fabrico, perfil solar, etc.

Tem havido um interesse contínuo nos sistemas CTR com abordagem beam-down, que se baseiam em óticas secundárias do tipo focalizante (colocadas no topo da torre) e em óticas do tipo CPC (Concentrador Parabólico Composto) [1]–[3] como concentrador terciário (que envolve a cavidade recetora). Pese embora os sistemas com abordagem beam-down tenham habitualmente eficiência ótica mais baixa do que um sistema CTR convencionais (devido a um número adicional de reflexões da luz), existe potencialmente uma compensação entre a energia coletada com a concentração, como também opções de design para aprimorá-las [5]. Para além disso, a cavidade recetora poderá ser colocada perto do solo o que poderá facilitar a operação e manutenção do sistema.

Na Figura 1.2 mostra-se um exemplo de uma configuração CTR com beam-down.

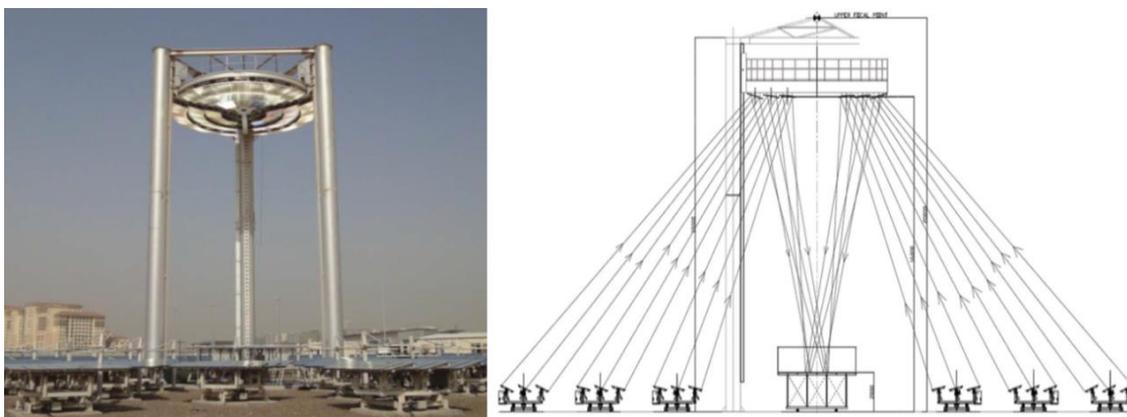


Figura 1.2: Um CTR com abordagem beam-down e respetiva representação esquemática [6].

Neste trabalho será feita uma análise deste tipo de soluções e, em particular, a aplicação de concentradores do tipo SMS (*Simultaneous Multiple Surface*) com óticas terciárias para a obtenção de elevados níveis de concentração incluindo *gaps* entre os espelhos para evitar pontes térmicas. Com efeito, um dos problemas das óticas terciárias, reside no gradiente térmico elevado entre a superfície refletora e a superfície recetora (que pode atingir temperaturas acima de 1000°C). Esta situação pode conduzir à geração de pontes térmicas, levando à destruição dos materiais envolvidos, em particular as superfícies refletoras. Uma forma de contornar o problema será incluir um *gap* entre as superfícies refletoras e recetoras, como se mostra na Figura 1.3. Contudo, a presença deste *gap* induz normalmente uma perda de luz, baixando dessa forma a eficiência ótica e a concentração obtida.

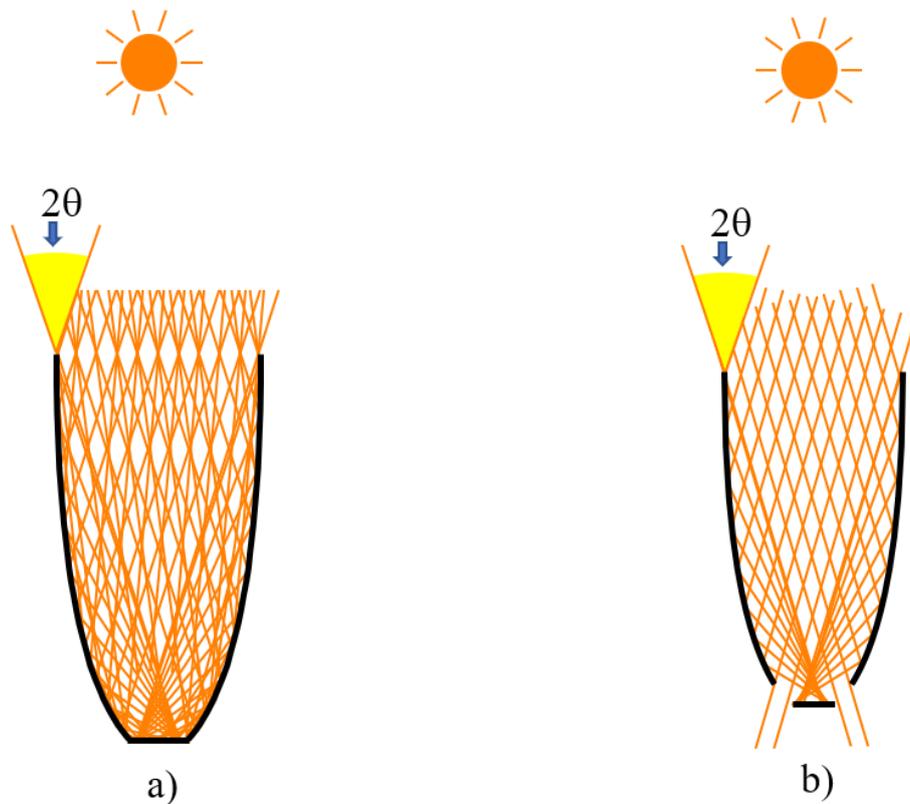


Figura 1.3: Concentrador CPC desenhado para uma aceitação de 2θ . a) Não existindo *gap* entre os espelhos e o recetor, toda a luz que incide à entrada do coletor dentro do ângulo 2θ é capturada. b) Se existir um *gap* entre os espelhos e o recetor existirá perda de luz pelo mesmo, baixando a eficiência do sistema.

Uma solução inovadora com base em concentradores SMS será apresentada por forma a corrigir este problema e, mais tarde, aplicada a sistemas CTR. Por forma a testar os méritos das novas soluções, serão realizados estudos comparativos entre soluções correntes e as novas abordagens, através de uma metodologia de comparação dos parâmetros óticos

como a eficiência ótica, CAP (*Concentration-Acceptance Product*) e curvas de IAM (*Incidence Angle Modifier*).

1.1 Motivação e Objetivos

A melhoria das presentes configurações CTR afigura-se como uma ideia promissora pelo mencionado potencial de aplicação. Essa melhoria poderá ser feita recorrendo a óticas do tipo SMS. Estas óticas, para além de se aproximarem dos limites de concentração, permitem resolver a questão de ponte térmica, pela possibilidade de acomodarem um *gap* entre os espelhos e o recetor sem perdas óticas (concentração). Esse desenvolvimento já foi feito no seio da Cátedra Energias Renováveis da Universidade de Évora, faltando agora testar a sua aplicação às tecnologias CTR.

Os principais estudos do presente trabalho são:

1. Desenho e simulação de óticas CTR com abordagem beam-down;
2. Desenho de concentradores XX SMS com *gap* e sem perdas óticas;
3. Aplicações das óticas XX SMS para corrigir as perdas de *gap* no concentrador CPC.
4. Simulação de óticas terciárias do sistema CTR com abordagem beam-down e análise dos resultados para uma configuração típica construída.

1.2 Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

No Capítulo 2 são apresentadas revisões dos conceitos teóricos essenciais associados às tecnologias de concentração solar;

No Capítulo 3 apresenta o desenho e modelação de duas soluções CTR com abordagem beam-down. Neste Capítulo também é feito o estudo comparativo e escolha de solução base a utilizar.;

No Capítulo 4 é apresentado um novo concentrador do tipo XX SMS;

No Capítulo 5 é apresentada a aplicação das óticas XX SMS a um concentrador do tipo CPC e posterior aplicação um concentrador torre beam-down;

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões sobre o trabalho assim como perspetivas de melhoramento e trabalhos futuros.

Capítulo 2

2 Fundamentos Teóricos

2.1 Concentração solar

A concentração da radiação solar torna-se necessária quando se pretende atingir temperaturas mais elevadas do que as que convencionalmente se obtêm por captura direta da radiação incidente. Na Figura 2.1, mostra-se um exemplo de um sistema de concentração (concentrador) com uma área de entrada (abertura) A_a , e saída (recetor) A_r .

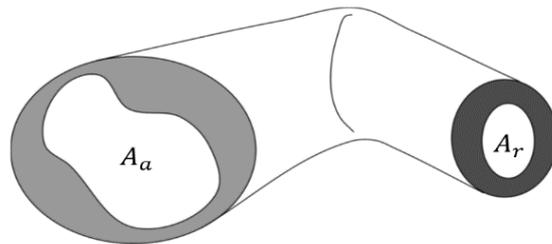


Figura 2.1: Sistema de concentração solar.

Neste trabalho, quando se refere ao termo “fator de concentração/concentração” de um sistema de concentração, significa “concentração geométrica” que é definida pela razão entre a área da abertura do refletor e a área do recetor, dado por [4]:

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (2.1)$$

2.2.1 Limite de concentração

A quantidade de radiação solar direta que pode ser concentrada é limitada pela segunda lei de termodinâmica. Considere-se o sistema ótico representado na Figura 2.2 [2]. Um corpo negro cilíndrico S_R de raio r à temperatura T , emite luz para o espaço à temperatura de $0K$. À medida que a luz percorre o espaço, suponhamos que esta atinge um cilindro de raio d , em que, na superfície do cilindro existe um concentrador.

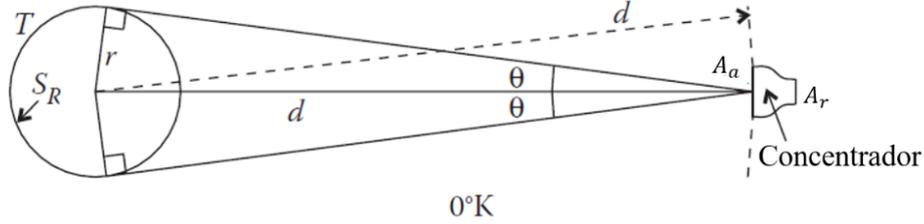


Figura 2.2: Vista superior de um sistema linear.

Um corpo negro de área dA à temperatura T emite radiação de dispersão Lambertiana e a taxa total emitido é:

$$d\Phi = \sigma T^4 dA \quad (2.2)$$

Onde σ é a constante de Stephan-Boltzmann. A taxa emitida pelo corpo negro cilíndrico de comprimento l_U é dado por:

$$\Phi_U = 2\pi\sigma T^4 l_U \quad (2.3)$$

No caso de um comprimento unitário ($l_U = 1$) a expressão fica simplesmente:

$$\Phi_U = 2\pi\sigma T^4 \quad (2.4)$$

A entrada A_a só pode fazer trocas de radiação com a fonte S_R ou com o resto do universo, que está a $0K$. Assim, a quantidade de radiação que A_a recebe é:

$$\Phi_a = \sigma T^4 \frac{2\pi r}{2\pi d} A_a \quad (2.5)$$

Esta potência pode agora ser concentrada, sem perdas, na área A_r através do concentrador. Suponhamos que A_r aquece ao máximo possível ($T = T_r$) estabilizando nesse valor. Neste caso, a potência emitida será:

$$\Phi_r = \sigma A_r T^4 \quad (2.6)$$

De forma a manter a temperatura estabilizada, é necessário que A_r esteja em equilíbrio térmico, ou seja, a radiação que recebe de S_R é, no limite, igual à radiação emitida para o exterior. Neste caso, temos:

$$\Phi_a = \Phi_r \Leftrightarrow A_r = A_a r/d \Leftrightarrow A_r = A_a \sin \theta \quad (2.7)$$

Note-se que A_r faz trocas de radiação com S_R através da entrada A_a do concentrador. A radiação que sai de A_a e entra em A_r só pode ser dirigida a S_R . De facto, se A_r pudesse enviar a sua radiação para o espaço, deveria também receber a radiação vinda do mesmo, que está a 0 K e, neste caso, poderia não atingir a temperatura de S_R . O ângulo de aceitação do dispositivo com entrada A_a e saída A_r não pode ser maior que o ângulo θ representado na Figura 2.2. Isto significa que o concentrador não consegue captar radiação que lhe chegue de uma direção fora de 2θ . Da mesma forma, a radiação emitida por A_r saindo através de A_a fica confinada ao mesmo ângulo 2θ . Note-se que a entrada A_a é curvada com raio d . Contudo, é possível tornar a fonte S_R maior e empurrá-la para a esquerda de tal forma que $r/d = \text{constante}$ e, portanto, o ângulo θ permanece igualmente constante.

À medida que o raio d e a entrada A_a do concentrador aumentam, este tende para uma superfície plana. Neste caso limite, o máximo de concentração é representado por [2]:

$$C_{max,2D} = \frac{1}{\sin \theta} \quad (2.8)$$

Este é o valor máximo de concentração para sistemas de concentração linear (em 2-D). Uma generalização adicional deste resultado é obtida, quando o concentrador é feito de um material com índice de refração, n .

$$C_{max,2D} = \frac{n}{\sin \theta} \quad (2.9)$$

Neste caso, A_r (recetor) está imerso nesse índice de refração. Geralmente $n = 1$ (recetor está imerso no ar ou vácuo) e o ângulo de semiabertura do cone solar é $\theta_s = 4.7 \text{ mrd}$, portanto, a concentração máxima para esses sistemas é de $213 \times$.

Uma análise idêntica pode ser feita, para o cálculo do valor máximo de concentração em 3D cujo resultado é dado por:

$$C_{max,3D} = \frac{1}{\sin^2 \theta} \quad (2.10)$$

Para θ_s , a concentração máxima para estes sistemas é de $45300 \times$.

2.1.1. Relação entre Temperatura e concentração

A segunda lei da Termodinâmica não só determina o limite geométrico da concentração, como também o limite de temperatura operacional do concentrador. Assume-se que a temperatura do sol é T_s ; e o resto do universo, denominado temperatura ambiente, está a $T_{amb} = 0K$. A radiação emitida pelo sol é:

$$\Phi_S = 4\pi r_S^2 \sigma T_S^4 \quad (2.11)$$

Onde r_S é o raio do sol. A radiação incidente num coletor com abertura A_a é:

$$\Phi_a = \frac{A_a}{4\pi d_{S-T}^2} 4\pi r_S^2 \sigma T_S^4 \quad (2.12)$$

Em que d_{S-T}^2 é a distância do sol à terra. Para a metade do ângulo de abertura do cone solar θ_S :

$$\sin \theta_S = \frac{r_S}{d_{S-T}} \quad (2.13)$$

A radiação transferida do sol para o recetor é dada por:

$$Q_r = \tau\mu\Phi_a = \tau\mu A_a \sin^2 \theta_S \sigma T_S^4 \quad (2.14)$$

Onde $\tau = (1 - \text{perdas óticas na atmosfera e no coletor})$ e μ é a absortividade do recetor para a radiação solar incidente. As perdas no coletor são então dadas por:

$$Q_{r,per} = \epsilon A_r \sigma T_r^4 \quad (2.15)$$

Onde A_r , T_r^4 e ϵ são, respetivamente, a área, temperatura e emitância do recetor. Se a fração η da radiação solar incidente Q_r for usada como calor aproveitado e/ou perdida por convecção ou condução, então refazendo o balanço de energia no recetor temos:

$$Q_r = Q_{r,per} + \eta Q_r \Leftrightarrow (1 - \eta)\tau\mu A_a \sin^2 \theta_S \sigma T_S^4 = \epsilon A_r \sigma T_r^4 \quad (2.16)$$

Introduzindo a definição de concentração $C_{3D} = A_a/A_r$ e a concentração máxima $C_{max,3D} = 1/\sin^2 \theta_S$, então a temperatura no recetor será:

$$T_r = T_S \sqrt[4]{(1 - \eta)\tau \frac{\mu}{\epsilon} \frac{C_{3D}}{C_{max,3D}}} \quad (2.17)$$

2.1.2. Eficiência instantânea de um coletor solar

A eficiência instantânea de um coletor solar é definido pela razão entre a potência instantânea extraída, $Q_{r,ext}$, e a potência instantânea incidente na área de abertura, dado por:

$$\eta = \frac{Q_{r,ext}}{I_C A_a} \quad (2.18)$$

Onde I_C é a potência incidente no coletor por unidade de área.

A potência extraída, $Q_{r,ext}(T_r)$, para uma dada temperatura do recetor, pode ser descrita pela diferença entre a potência absorvida pelo recetor, Q_r , e a potência perdida pelo mesmo, $Q_{r,per}$:

$$Q_{r,ext}(T_r) = Q_r - Q_{r,per}(T_r) \quad (2.19)$$

A potência absorvida não é dada em função da temperatura, sendo determinada pelas características óticas do sistema. No caso de um coletor plano, a radiação atravessa uma placa transparente (com um coeficiente de transmissão τ) e é absorvida por uma placa recetora (com absorvância μ). Com isso, a eficiência ótica, η_0 , na direção da radiação perpendicular ao coletor é dado por:

$$\eta_0 = \tau\mu \quad (2.20)$$

A partir da Equação (2.20), temos:

$$Q_r = I_C A_a \eta_0 \quad (2.21)$$

Quanto a potência perdida, é costume introduzir-se um fator U (coeficiente global de perdas térmicas) e representar $Q_{r,per}$ pela equação:

$$Q_{r,per} = A_a U(T_r)(T_r - T_{amb}) \quad (2.22)$$

Onde T_{amb} é a temperatura do ar ambiente. Juntando as equações obtidas temos:

$$\eta(T_r) = \eta_0 - \frac{U(T_r)(T_r - T_{amb})}{I_C} \quad (2.23)$$

Como a temperatura do recetor é difícil de determinar, então a eficiência instantânea do coletor é escrito em função de temperaturas de mais fácil determinação.

Sendo T_{in} a temperatura de entrada no coletor e, T_{out} , a temperatura de saída, define-se T_f como a temperatura média do fluido:

$$T_f = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (2.24)$$

Do ponto de vista do cálculo da energia fornecida pode usar-se T_f , T_{in} ou T_{out} sendo, no entanto, necessário introduzir um fator F que permite passar da Equação (2.23) para a seguinte equação:

$$\eta(T_x) = F \left[\eta_0 - \frac{U(T_x)(T_x - T_{amb})}{I_C} \right] \quad (2.25)$$

Geralmente, F designa-se por F' quando $T_x = T_f$, F_R quando $T_x = T_{in}$ e F'' quando $T_x = T_{out}$.

É possível, com um conhecimento dos materiais utilizados no coletor e tendo em conta a geometria e o modo de funcionamento do coletor, estimar os valores de F' , η_0 , $U(T_x)$, mas estes devem ser sempre medidos para cada coletor.

2.1.3. Modificador de ângulo de incidência

Para o cálculo da eficiência ótica ser mais exato, o modificador de ângulo de incidência (IAM) é o parâmetro a utilizar. Aqui indicado por $K(\theta_i)$, o IAM traduz a variação da eficiência ótica para o ângulo de incidência, θ_i , com a normal à superfície coletora. Para alguns coletores essa variação depende dos planos transversal e longitudinal da superfície coletora. A determinação do IAM de um coletor pode ser feito de duas formas distintas:

Por ajuste experimental: Testando diretamente o coletor em ensaios de laboratório, é possível obter um conjunto de valores da eficiência ótica para diferentes direções de incidência. Os resultados são aproximados à seguinte função:

$$K(\theta_i) = 1 + b_0 \left(\frac{1}{\cos \theta_i} - 1 \right) \quad (2.26)$$

Onde b_0 é um parâmetro de ajuste para coletores com cobertura de vidro plana [1].

Por simulação numérica: construindo um algoritmo que determine a eficiência ótica em várias direções (em particular para a direção perpendicular), é possível determinar o IAM fazendo o seguinte cálculo:

$$K(\theta_i) = \frac{\eta(\theta_i)}{\eta_0} \quad (2.27)$$

Onde η_0 é a eficiência ótica à incidência normal. Este é o método utilizado no presente trabalho, sendo que o cálculo é feito utilizando a ferramenta de traçado de raios Tonatiuh [7].

2.1.4. Ângulo de aceitação

Em geral é de difícil determinação a função do ângulo de aceitação para qualquer concentrador, sendo que a sua determinação é geralmente feita de forma explícita, isto é, por via experimental e/ou simulação numérica. O ângulo de aceitação é definido como o ângulo de incidência para o qual o fluxo capturado pelo recetor é de 90% do máximo (as perdas óticas são considerados neste cálculo) para uma certa direção de incidência da luz. Para este cálculo, a ótica e todos os seus componentes permanecem estáticos à medida que o sol se move no céu.

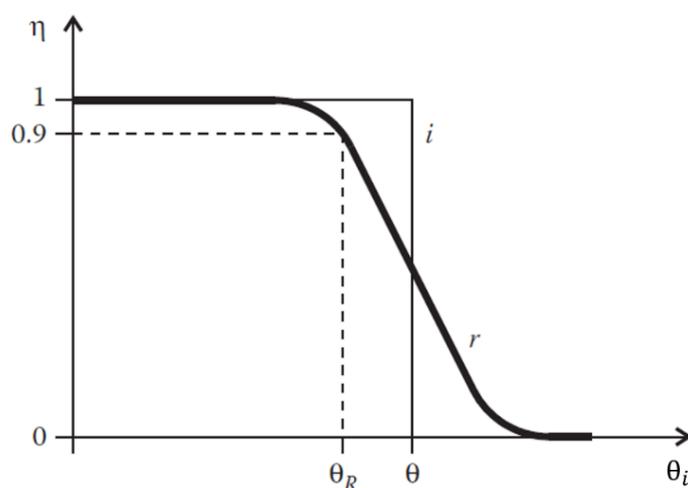


Figura 2.3: Representação da curva de transmissão/eficiência, $\eta(\theta_i)$ [2].

Na Figura 2.3 é representada a curva de transmissão, $\eta(\theta_i)$, para diferentes ângulos de incidência, θ_i . A curva i representa a função de transmissão ideal do coletor, que captura toda luz dentro do ângulo de aceitação θ (Equação (2.8) e (2.10)). Contudo, os sistemas reais tendem a não ser ideais como esquematicamente representado pela curva r . O ângulo θ_R , inferior ao ângulo máximo (teórico) θ , é comumente definido como o ângulo para o qual a transmissão (eficiência) do concentrador cai para 90% do seu máximo [8].

2.1.5. Produto concentração-aceitação (CAP)

Ao comparar concentradores solares, pode-se usar uma quantidade chamada de produto aceitação-concentração, que para sistemas 3D é definido por:

$$CAP = \sqrt{C} \sin \theta_R \quad (2.28)$$

Como se pode constatar a Equação (2.28) deriva da Equação (2.10) e, portanto, imediatamente se conclui que $CAP \leq n$. Este parâmetro permite assim medir quão perto um

concentrador solar está do limite termodinâmico. A concentração C pode ser determinada pela Equação (2.1) e o valor de θ_R através de simulação numérica.

Para o caso de um recetor imerso em ar, $n = 1$, o CAP será sempre inferior ou igual a 1. O objetivo de um concentrador solar é ter um CAP o mais alto possível (alta concentração C e maior ângulo de aceitação θ_R).

2.2 Ótica geométrica

A ótica geométrica é usada como uma ferramenta básica no design de praticamente qualquer sistema ótico, sendo elas formadoras de imagem ou não [3]. Ela é definida como o ramo da ótica que o comprimento de onda do feixe de luz é muito menor que a área de abertura do sistema que coleta esse mesmo feixe. Quando um raio de luz se propaga através de um sistema ótico, ela pode encontrar diferentes superfícies, onde é refratado ou refletido. A Figura 2.4 define os ângulos usados na análise da reflexão e refração da luz. O ângulo θ_i é chamado ângulo de incidência, θ_r o ângulo de reflexão e θ_t o ângulo de refração.

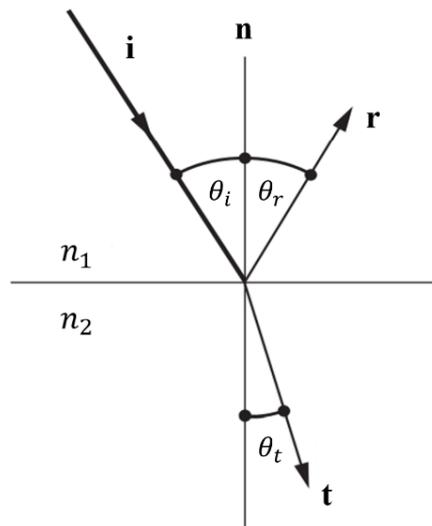


Figura 2.4: Reflexão e refração da luz num meio transparente[9].

Quando o raio de luz é refletido de uma superfície lisa, o raio de luz refletido (\mathbf{r}) faz o mesmo ângulo com a normal à superfície (\mathbf{n}), que o raio incidente (\mathbf{i}), portanto, $\theta_i = \theta_r$. Neste caso o raio refletido, a normal à superfície e o raio incidente são coplanares. Os ângulo de incidência e de refração são relacionados pela lei de Snell [9]:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (2.29)$$

O comprimento do caminho ótico de uma seção de raio entre duas superfícies óticas é definido como o produto do índice de refração e a distância que o raio percorre entre essas superfícies. O comprimento total do caminho ótico de um raio é a soma dos comprimentos do caminho ótico para todas as seções do raio. Esta definição deriva do Princípio de Fermat o qual diz que a luz percorre sempre o caminho mais rápido entre dois pontos[2].

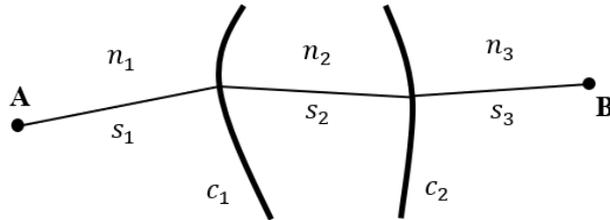


Figura 2.5: Caminho ótico entre dois pontos A e B.

A Figura 2.5 representa um raio de luz que se propaga de um ponto **A** a **B**, enquanto cruza as superfícies óticas c_1 e c_2 . O índice de refração do material é n_1 entre **A** e c_1 , n_2 entre c_1 e c_2 e n_3 entre c_2 e **B**. O comprimento do caminho ótico entre o ponto **A** e **B** é dado por:

$$S = n_1 s_1 + n_2 s_2 + n_3 s_3 \quad (2.30)$$

Define-se como frente de onda a(s) superfície(s) tal os raios emitidos por um emissor **A** são perpendiculares a essa(s) mesma(s) superfície(s) e que o caminho ótico percorrido por esses raios até a um recetor **B** seja constante, como se mostra na Figura 2.6. Neste caso w é uma frente de onda do emissor **A** (emissor esférico ou pontual e, portanto, a frente de ondas é o arco de círculo w centrado em **A**).

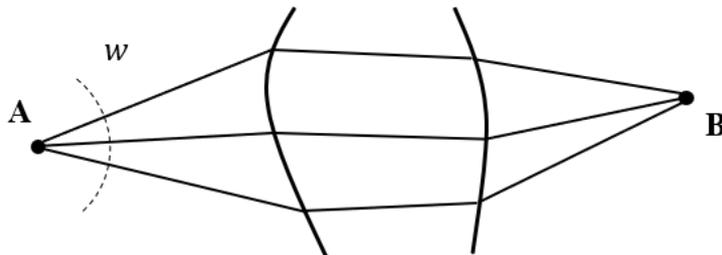


Figura 2.6: Definição de frente de ondas.

Qualquer sistema ótico tem uma abertura de entrada e uma de saída. Sendo que, os raios que cruzam a abertura de entrada do sistema podem ou não sair dele. Um sistema ideal, sem perdas, é aquele que consegue colocar todos os raios que cruzam a entrada num ângulo sólido $\pm\theta$ na sua saída num ângulo sólido $\pm\pi/2$. A maneira mais explícita de falar sobre isso, em ótica geométrica, é falar sobre o "*etendue*".

2.2.1 Conceito de Etendue

Quando a luz atravessa uma área dA (sistema ótico), imerso em um meio de índice de refração n , é exigida um “espaço”. Este espaço tem dois componentes: “espaço físico” medido pela área e “espaço angular” medido pelo ângulo sólido, como se pode ver na Figura 2.7.

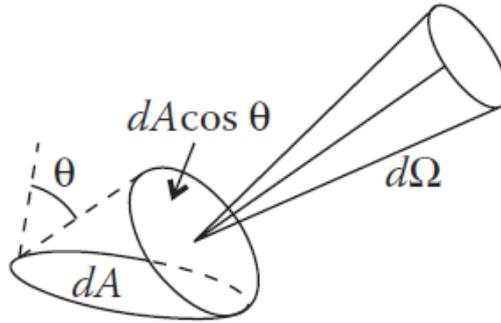


Figura 2.7: Representação do “espaço físico” ($dA \cos \theta$) e do “espaço angular” ($d\Omega$).

No entanto, se a luz cruzar a área dA em uma direção θ com à normal, então a área projetada $dA \cos \theta$ é a área disponível para a passagem. Portanto, *etendue* infinitesimal é o produto entre a área disponível $dA \cos \theta$ e o espaço angular $d\Omega$, dado por:

$$dU = n dA \cos \theta d\Omega \quad (2.31)$$

Estes dois componentes do “espaço”, definem uma quantidade puramente geométrica, assim sendo, *etendue* é definida como uma quantidade geométrica que mede a quantidade de “espaço” disponível para a passagem da luz.

Se a geometria do sistema for bidimensional (2D) o *etendue* é dado por [2]:

$$U_{2D} = 2na \sin \theta \quad (2.32)$$

Onde U_{2D} , é o *etendue* da radiação que atravessa o comprimento a , imerso em um meio de índice de refração n , dentro de um ângulo $\pm\theta$. Para sistemas tridimensionais (3D), o *etendue* é definido por:

$$U_{3D} = 2n^2 A \sin^2 \theta \quad (2.33)$$

Onde A , é a área da entrada do sistema ótico.

2.2.1.1 Conservação de etendue

Uma aplicação típica da ótica sem imagem é transferir a radiação de uma fonte para um recetor, conservando o *etendue*. O que torna *etendue* um conceito central no campo da ótica sem imagem. A conservação de *etendue* pode ser derivada de muitos contextos, sendo que no presente trabalho esta é apresentada do ponto de vista da radiometria.

Se uma área dA , imerso em um meio de índice de refração n , emite (ou é atravessada) por uma radiação de fluxo $d\Phi$ (W) que faz um ângulo θ em relação ao normal \mathbf{n} , contido dentro de um ângulo sólido $d\Omega$, representada na Figura 2.8, temos que:

$$d\Phi = L^* dU = \frac{L}{n^2} n^2 dA \cos \theta d\Omega \quad (2.34)$$

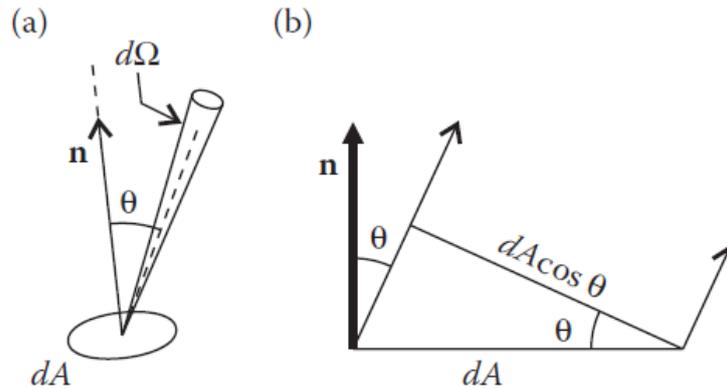


Figura 2.8: Definição da radiância na geometria 3D (a) e 2D (b) [2].

Onde dU é o etendue da radiação e $L^* = L/n^2$ é chamado de radiância base.

Considere-se que uma área infinitesimal dA_1 emite radiação na direção de dA_2 , para um meio de índice de refração n , separadas por uma distância r , representada na Figura 2.9.

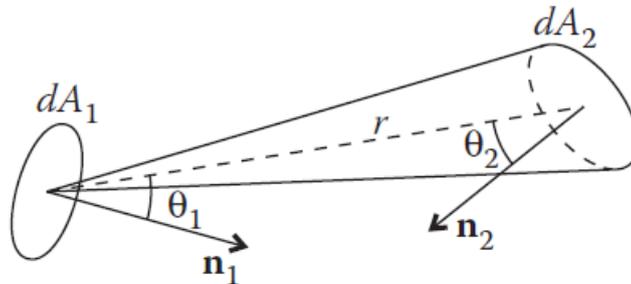


Figura 2.9: Transferência de radiação entre as superfícies dA_1 e dA_2 .

Por definição, um feixe de luz/radiação é composto por um raio central e todos os raios que passam pelas áreas dA_1 e dA_2 . Note-se que r é uma quantidade finita, mas dA_1 e dA_2 são infinitesimais. As áreas dA_1 e dA_2 têm normais n_1 e n_2 , que faz ângulos θ_1 e θ_2 , em direção de r (raio central). O ângulo sólido $d\Omega_1$ é definido na área dA_1 pela área dA_2 , e é dado como:

$$d\Omega_1 = \frac{dA_2 \cos \theta_2}{r^2} \quad (2.35)$$

De acordo com a Equação (2.34), a radiância L_1 sobre dA_1 é representado por:

$$L_1 = \frac{d\Phi_1}{d\Omega_1(dA_1 \cos \theta_1)} = \frac{d\Phi_1}{(dA_2 \cos \theta_2 / r^2)(dA_1 \cos \theta_1)} \quad (2.36)$$

Seguindo um raciocínio semelhante, temos:

$$L_2 = \frac{d\Phi_2}{d\Omega_2(dA_2 \cos \theta_2)} = \frac{d\Phi_2}{(dA_1 \cos \theta_1 / r^2)(dA_2 \cos \theta_2)} \quad (2.37)$$

Para um meio não absorvente, a radiação de fluxo que passa através das superfícies dA_1 e dA_2 , por um feixe contínuo de raios permanece constante [4], ou seja, $d\Phi_1 = d\Phi_2$. Então a radiância que atravessa as duas áreas é conservada, com isso, o *etendue* é também conservado.

Para a conservação do *etendue* o produto da área projetada e o ângulo sólido deve ser constante. Isso significa que, se a área disponível para a luz for aumentada, o ângulo sólido diminuirá. Mas se a área diminuir, o ângulo sólido deverá aumentar, de modo que o *etendue* permaneça constante. Podemos reduzir a área pela qual a luz passa, desde que aumentemos o ângulo sólido, para que o espaço disponível para a passagem da luz permaneça constante.

2.2.1.2 Concentração máxima

A conservação de *etendue* também pode ser usada para calcular o máximo de concentração que um sistema ótico pode fornecer. Considere-se um sistema ótico representada na Figura 2.10, com uma abertura de entrada a_{in} , e saída a_{out} , sendo θ_{in} o ângulo de semi-abertura para a radiação na entrada.

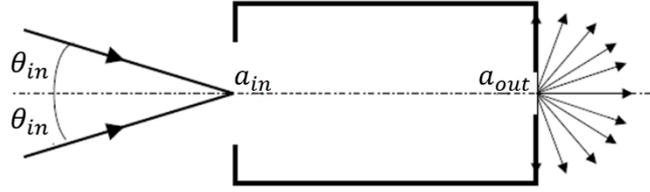


Figura 2.10: Sistema óptico de concentração. A entrada a_{in} é iluminada por um feixe radiativo dentro de um ângulo sólido $\pm\theta_{in}$. No caso ideal, a saída a_{out} emite luz dentro do ângulo $\pm\pi/2$.

Considere-se ainda que a radiação seja uniforme nas aberturas de entrada e de saída. Para o índice de refração na entrada de n_{in} , o *etendue* da radiação que entra no sistema é dado por:

$$U_{in} = 2n_{in}a_{in} \sin \theta_{in} \quad (2.38)$$

Com um raciocínio semelhante, o *etendue* da radiação que sai do sistema é dado por:

$$U_{out} = 2n_{out} a_{out} \sin \theta_{out} \quad (2.39)$$

Onde θ_{out} é o ângulo sólido da radiação à saída do concentrador. Como o *etendue* é conservado na passagem através de um sistema óptico, o *etendue* na entrada deve ser igual ao da saída, ou seja, $U_{in} = U_{out}$, portanto:

$$\frac{a_{in}}{a_{out}} = \frac{n_{out}}{n_{in}} \frac{\sin \theta_{out}}{\sin \theta_{in}} \quad (2.40)$$

O ângulo θ_{out} na saída não pode ser maior que $\pi/2$, portanto, a abertura mínima da saída a_{min} pode ser obtida para $\theta_{out} = \pi/2$. Esta área corresponde o máximo de concentração possível:

$$C_{max,2D} = \frac{a_{in}}{a_{min}} = \frac{n_{out}}{n_{in}} \frac{1}{\sin \theta_{in}} \quad (2.41)$$

No caso específico em que o índice de refração na entrada do dispositivo seja $n_{in} = 1$:

$$C_{max,2D} = \frac{n_{out}}{\sin \theta_{in}} \quad (2.42)$$

Uma análise idêntica pode ser feita, para o cálculo do valor máximo de concentração em 3D, cujo resultado é dado por:

$$C_{max,3D} = \frac{n_{out}^2}{\sin^2 \theta_{in}} \quad (2.43)$$

2.2.1.3 Princípio das cordas de Hottel

O *etendue* trocado entre duas superfícies pode ser dado pela diferença do comprimento do caminho ótico [2]. No caso específico de ter o índice de refração $n = 1$, os comprimentos do caminho ótico coincidem com as distâncias entre os pontos. Como exemplo da demonstração do princípio das cordas de Hottel, considere-se duas superfícies $\mathbf{R}_1\mathbf{R}_2$ e $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2$, representada na Figura 2.11. Considerando que a superfície $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2$ é uma fonte Lambertiana que ilumina totalmente a superfície $\mathbf{R}_1\mathbf{R}_2$, ou seja, cada ponto entre \mathbf{P}_1 e \mathbf{P}_2 ilumina completamente a superfície $\mathbf{R}_1\mathbf{R}_2$.

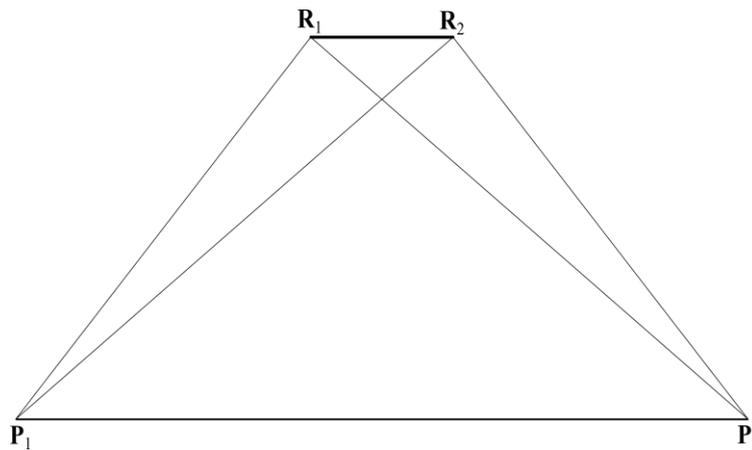


Figura 2.11: *Etendue* trocado entre as superfícies $\mathbf{R}_1\mathbf{R}_2$ e $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2$.

Assim sendo, o *etendue* trocado entre as duas superfícies é representado por [2]:

$$U_{P_1P_2-R_1R_2} = [P_1, R_2] + [P_2, R_1] - [P_1, R_1] - [P_2, R_2] \quad (2.44)$$

Em que $[A, B]$ representa a distância euclidiana entre dois pontos A e B .

Capítulo 3

3 Concentrador CTR com abordagem beam-down

3.1 Sistema de concentração

O sistema de concentração CTR com abordagem beam-down, é proposto como uma alternativa do sistema de concentração CTR [10]. Nestas configurações, a radiação solar refletida pelos heliostatos é interceptada por um espelho refletor (secundário) no topo da torre, que é redirecionada para o terciário e depois capturado pelo recetor plano, como se verifica na Figura 3.1. Embora isto não elimine a necessidade de ter suportes estruturais para o espelho secundário, o fato de o recetor ser colocado próximo ao solo pode facilitar sua instalação, operação e manutenção [11]. Podendo também facilitar o funcionamento do sistema, o que pode ser especialmente importante para os reatores de metalurgia/cal/combustíveis solares.

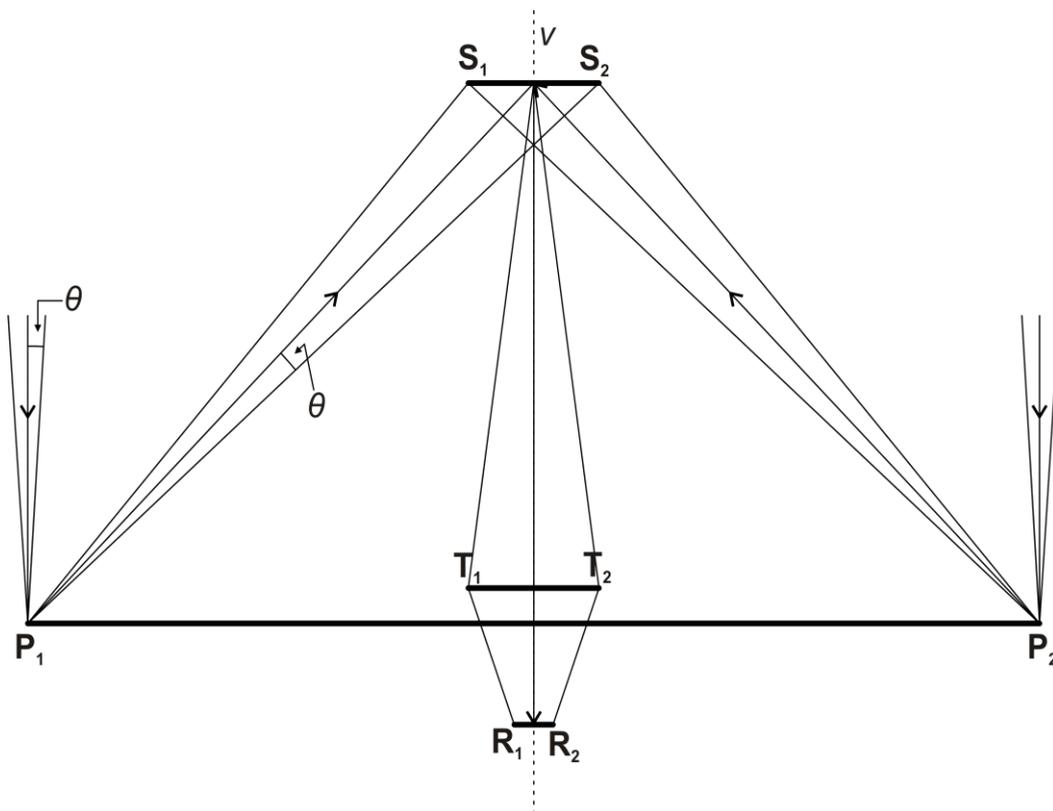


Figura 3.1: Representação esquemática do concentrador CTR com abordagem beam-down.

A inclusão do terciário está relacionada com o facto de, sem ele, a distância entre o secundário e o recetor (que pode ser visto como um canal ótico) ser muito grande, aumentando consideravelmente o tamanho do primeiro, aumentando assim as perdas de sombreado. Além disso, o tamanho do recetor "visto" do secundário seria muito curto, diminuindo o ângulo de aceitação (penalizando o CAP). Devido a estas razões, é necessário introduzir um elemento ótico intermédio entre o secundário e o recetor e é por isso que a fase terciária está incluída.

Os concentradores CTR com abordagem beam-down são tecnologias do tipo *imaging/focalizante* e tendem a ficar muito longe do limite de concentração teórico. Este fato penaliza sua performance geral, exigindo fatores de concentração muito maiores para alcançar a alta temperatura desejada (penalizando o ângulo de aceitação, levando a componentes mais precisos e caros para acomodar os erros óticos).

A ótica *non-imaging* (NIO) é um ramo de ótica dedicado ao desenvolvimento de soluções óticas altamente eficientes, alcançando, em muitos casos, a concentração máxima. No entanto, se usados apenas por si só, estas óticas geralmente são restritas a fatores de concentração baixa (ângulos de alta aceitação), pois tendem a ser muito altas (de elevada estrutura) para esses casos (baixa compactação). Neste sentido, pode-se combinar a ótica *imaging* com *non-imaging*, tendo uma boa compactação e alto fator de concentração [2].

3.2 Dimensionamento do sistema de concentração

O desenvolvimento dentro do campo da NIO, tem sido feito principalmente para sistemas de foco linear ou 2D. O desenho direto da ótica 3D é muito mais complexo por implicar desenhar para os planos sagital e meridional o que, muitas vezes se torna difícil. No entanto, uma vez que os sistemas 3D podem ser obtidos a partir de sistemas 2D por simetria de rotação, pode-se tirar partido de todo o desenvolvimento feito para sistemas de foco linear e aplicá-los aos concentradores CTR com abordagem beam-down. Neste sentido, um concentrador CTR pode ser visto como uma versão 3D de um concentrador de LFR (e de forma similar os concentradores de disco parabólico podem ser vistos como versão 3D dos concentradores PT) e, portanto, muitas ideias podem ser retiradas da combinação entre os primários de LFR e os espelhos secundários da NIO [12], [13].

3.2.1 Etendue-coupling

O processo de *etendue-coupling* significa, em termos simples, a conservação do *etendue* em todas as fases óticas do concentrador até que a luz chegue ao recetor [14]. Este é um aspeto crucial no concentrador solar, uma vez que a não conservação do *etendue* penaliza o CAP, não permitindo atingir o máximo de concentração possível. Este processo pode ser adotado para o concentrador CTR para estabelecer as dimensões adequadas do sistema

(entrada de abertura, altura da torre, etc.), uma vez que existe, para um conjunto de entradas, uma restrição física do sistema para conservar o *etendue*. É particularmente importante para configurações beam-down, uma vez que existem múltiplas fases óticas e a perda de luz (*etendue*) penalizará o resultado geral. Por outro lado, para alcançar a concentração máxima, é necessário projetar adequadamente todos os elementos óticos que compõem o concentrador. Isto pode ser feito usando as ferramentas da NIO, em particular o princípio de raios extremos [2] (a luz vinda dos extremos da fonte deve ser redirecionada para os extremos do recetor) mas também recorrendo ao método das cordas de Hottel (ver Capítulo 2, secção Princípio das cordas de Hottel), para garantir a conservação do *etendue* entre todos os estágios óticos. Estas ferramentas provaram o potencial para alta concentração e produção de energia altamente eficiente e foram aplicados com sucesso em concentradores LFR e PT [11], [13].

Considerando a representação esquemática do sistema de concentração, representada na Figura 3.1. A luz que atinge o primário $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2$ e é refletida no secundário $\mathbf{S}_1\mathbf{S}_2$. Em seguida, a luz é refletida em direção ao terciário $\mathbf{T}_1\mathbf{T}_2$ e finalmente coletado pelo recetor $\mathbf{R}_1\mathbf{R}_2$. Independentemente dos elementos óticos escolhidos (espelho, lente, etc.) para o concentrador redirecionar o feixe de luz, é necessário garantir que as dimensões de cada estágio estejam corretamente projetadas, para garantir a máxima concentração e eficiência. Isto pode ser feito através da conservação de *etendue* (Princípio das cordas de Hottel), para definir as dimensões ideais do sistema.

Embora a configuração final seja uma ótica 3D, o desenho e a otimização podem ser feitos em 2D, pois as soluções finais podem ser alcançadas por simetria de rotação. Considere-se que as posições $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2$ sejam conhecidas, bem como o ângulo de aceitação θ (que pode ser obtido definindo um valor de concentração geométrica inicial e recorrendo à Equação (2.8)). Então o *etendue* capturado pelo primário, $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2$, é o seguinte (considerando que todas as superfícies estão imersas em ar ou vácuo, $n = 1$):

$$U_{P_1P_2} = 2[\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2] \sin \theta \quad (3.1)$$

Onde $[\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2]$ é a distância euclidiana entre \mathbf{P}_1 e \mathbf{P}_2 .

O *etendue* do primário deve permanecer constante em todos os estágios óticos para atingir a máxima concentração. Vamos considerar agora que o primário é uma fonte Lambertiana que ilumina totalmente o secundário $\mathbf{S}_1\mathbf{S}_2$. E que o secundário ilumina completamente o terciário $\mathbf{T}_1\mathbf{T}_2$, sem elementos óticos conectando ambos. Assim sendo, o *etendue* trocado entre o secundário e o terciário, $U_{S_1S_2-T_1T_2}$, é dado por:

$$U_{S_1S_2-T_1T_2} = [\mathbf{S}_1, \mathbf{T}_2] + [\mathbf{S}_2, \mathbf{T}_1] - [\mathbf{S}_1, \mathbf{T}_1] - [\mathbf{S}_2, \mathbf{T}_2] \quad (3.2)$$

A fim de conservar o *etendue*, $U_{P_1P_2} = U_{S_1S_2-T_1T_2}$. Como o sistema é simétrico em relação à linha vertical v , os pontos S_2 e T_2 são simétricos em relação a S_1 e T_1 , respetivamente. Para obter as dimensões do sistema, pode-se, por exemplo, forçar uma certa altura para os pontos S_1 e T_1 (componente y) relativamente a P_1P_2 e encontrar a largura apropriada (componente x), que melhor se ajusta à conservação do *etendue*.

Um processo semelhante é aplicado para encontrar as dimensões e a posição do recetor R_1R_2 . Seguindo o mesmo raciocínio, o terciário ilumina completamente o recetor R_1R_2 , sem elementos óticos conectando ambos. Temos que, o *etendue* trocado entre o terciário e o recetor, $U_{T_1T_2-R_1R_2}$, é dado por:

$$U_{T_1T_2-R_1R_2} = [T_1, R_2] + [T_2, R_1] - [T_1, R_1] - [T_2, R_2] \quad (3.3)$$

Com a conservação do *etendue* entre todos os estágios, $U_{P_1P_2} = U_{S_1S_2-T_1T_2} = U_{T_1T_2-R_1R_2}$, é suficiente para encontrar as posições R_1 e R_2 .

É claro que é possível adicionar mais estágios óticos para reduzir a distância entre eles. Isto tem a vantagem de reduzir o tamanho de cada componente ótico, mas, por outro lado, a desvantagem de aumentar a complexidade do sistema. No entanto, é importante ressaltar que, independentemente da configuração ótica escolhida, as dimensões do sistema são impostas e limitadas pela conservação do *etendue*, utilizando o método de cálculo apresentado acima.

3.3 Desenhos conceptuais dos componentes óticos

Tal como referido na secção anterior, uma vez que as dimensões do sistema, ou seja, porções P_1P_2 , S_1S_2 , T_1T_2 , R_1R_2 estão bem definidas, é necessário conceber corretamente os componentes óticos para atingir a concentração máxima. Nesse sentido, com os componentes óticos devidamente construídas será possível simular o comportamento do sistema sujeita a diversas condições. O processo geral de conceção de um concentrador CTR com abordagem beam-down é demonstrado na Figura 3.2. O concentrador foi criado em 2D e a versão 3D completa é obtida por simetria de rotação.

3.3.1 Desenho da ótica do primário e secundário

Nesta secção é apresentada uma solução baseada no método de ótica aplanatica ou *infinitesimal etendue* [15]. Este método é um caso limite em que a fonte solar é considerada um ponto e, portanto, os raios extremos colapsam num único raio (o ângulo de aceitação tende para zero). Esta aproximação é bastante razoável para fatores de concentração elevados, uma vez que, neste caso, o ângulo de aceitação é baixo (ver Equação. (2.8)) e, por conseguinte, o erro de considerar a fonte como ponto é pequeno.

Considerando a Figura 3.2, começamos por escolher o primeiro ponto do espelho primário, \mathbf{P} , o primeiro ponto do espelho secundário, \mathbf{S} , e um ponto focal \mathbf{F} . A posição de \mathbf{S} deve estar entre $\mathbf{S}_1\mathbf{S}_2$ e ao longo do eixo vertical v . A sua posição final deve ser ajustada de modo a corresponder ao tamanho de $\mathbf{S}_1\mathbf{S}_2$, ou seja, o último ponto do espelho secundário, \mathbf{S}_4 , deve ser o ponto \mathbf{S}_2 , de modo a corresponder ao etendue.

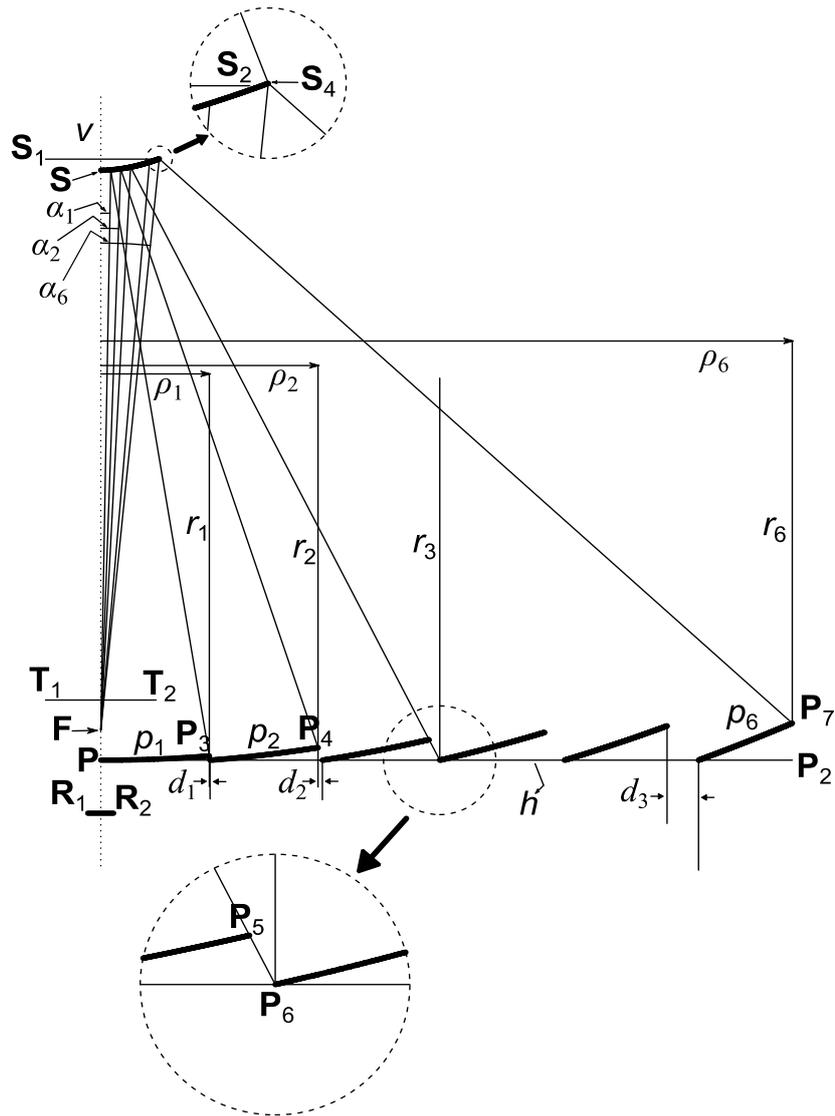


Figura 3.2: Processo de concepção de um concentrador CTR com abordagem beam-down.

No entanto, isto não acontece por razões que serão discutidas posteriormente. Do mesmo modo, o ponto \mathbf{F} deve ser escolhido entre $\mathbf{T}_1\mathbf{T}_2$ e ao longo de v . A sua colocação final é uma questão de otimização da ótica, embora um simples critério possa ser recolher os raios de extremos provenientes do espelho dos helióstatos (ver a Figura 3.2), seguindo o

Princípio dos raios extremos. Desta forma, estamos a aumentar as tolerâncias óticas (ângulo de aceitação) do concentrador, levando a um melhor desempenho. A otimização do ponto focal do espelho secundário pode ser feita lançando os raios extremos (raios vermelho e azul) sobre os espelhos heliostáticos para verificar se eles terminam (aproximadamente) perto das extremidades da ótica terciária ($T_1 T_2$), é representada na Figura 3.3.

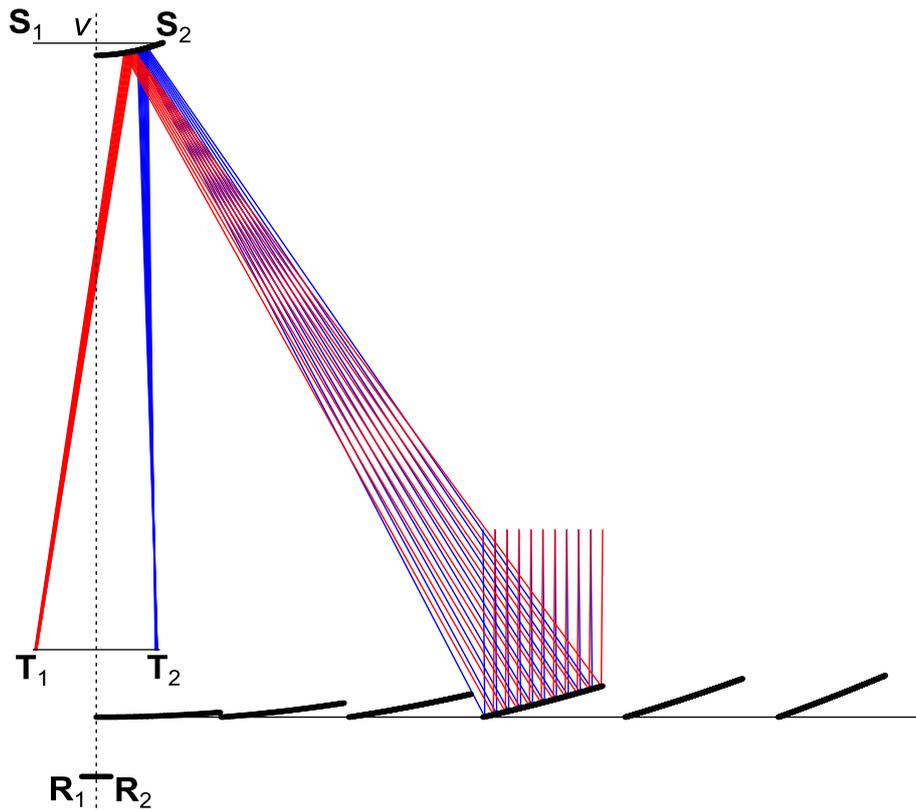


Figura 3.3: Otimização do ponto focal do espelho secundário, para apenas um helióstato. Os raios extremos não estão perfeitamente acoplados nas extremidades devido à aproximação aplanática.

Suponha-se agora que já conhecemos a posição do ponto P_3 do primeiro espelho p_1 , bem como o caminho do raio r_1 . Entre o ponto P e o P_3 há uma distância que se chama ampliação e é o que define uma ótica aplanática. Em que ρ_1 é dado por:

$$\rho_1 = f \sin \alpha_1 \quad (3.4)$$

Onde f é dado por:

$$f = \frac{nR}{2 \sin \theta} \quad (3.5)$$

Onde R é do tamanho do recetor $\mathbf{R}_1\mathbf{R}_2$, n é o índice de refração em que o recetor está imerso (neste caso consideramos $n = 1$) e α_1 é o ângulo que o raio r_1 faz com v após o seu reflexo do espelho secundário. Agora podemos mover-nos para outro helióstato, cruzando \mathbf{P}_3 com o eixo horizontal h (para uma melhor visualização ver o caminho do raio r_3 batendo no ponto \mathbf{P}_6 e cruzando \mathbf{P}_5), deixando uma distância d_1 entre p_1 e o segundo espelho helióstato p_2 . Agora passamos para um ponto \mathbf{P}_4 usando uma ampliação ρ_2 :

$$\rho_2 = f \sin \alpha_2 + d_1 \quad (3.6)$$

Onde α_2 é o ângulo que o raio r_2 (que atinge o ponto \mathbf{P}_4) faz com v , após o seu reflexo do espelho secundário. Agora o processo continua até ao ponto \mathbf{P}_7 (pertencente ao espelho do helióstato p_6) verticalmente acima do ponto \mathbf{P}_2 , preenchendo o campo primário $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_2$. Em que ρ_6 é dado por:

$$\rho_6 = f \sin \alpha_6 + d_1 + \dots + d_5 \quad (3.7)$$

Após reflexão sobre \mathbf{P}_4 , o raio r_6 atinge o espelho secundário no ponto \mathbf{S}_4 e reflete-se no ponto \mathbf{F} . Idealmente, o ponto \mathbf{S}_4 deve ser \mathbf{S}_2 , que corresponderia ao ajuste do *etendue* (como discutido na secção anterior). No entanto, tal não acontece devido à aproximação considerada neste método (fonte considerada como um ponto) bem como pelo facto de o primário ser descontínuo, tendo as "perdas de cosseno de *etendue*" em cada espelho [14]. No entanto, alterar a posição do ponto \mathbf{S} e induzir uma pequena etapa de cálculo de cada helióstato é possível minimizar este efeito.

Este processo é usado para projetar apenas os espelhos primários e secundários. Agora é necessário conceber também a ótica do terciário (definido entre os pontos \mathbf{T}_1 e \mathbf{T}_2).

3.3.2 Desenho da ótica do terciário

Mais uma vez, a inclusão do terciário é necessária para aumentar a aceitação global do concentrador. Sem ele, o tamanho do recetor "visto" do espelho secundário seria muito pequeno e o espelho secundário também teria de ser muito maior, induzindo ainda mais perdas de sombreado sobre o campo do primário. Normalmente, os sistemas CTR com abordagem beam-down baseiam-se em óticas terciários do tipo CPC, que liga o segmento $\mathbf{T}_1\mathbf{T}_2$ ao recetor $\mathbf{R}_1\mathbf{R}_2$ (ver Figura 3.1) [16].

Contudo, neste caso, temos uma fonte finita a uma distância finita (visto do terciário) que é o espelho secundário. Assim sendo, a utilização do CPC como um terciário pode não ser o mais apropriado, pois a fonte radiativa que ilumina a entrada do CPC é o sol, ou seja, as frentes de onda são as retas inclinadas a $\pm\theta$. Uma simples alternativa é a utilização de um concentrador CEC (Concentrador Elíptico Composto) como terciário, sendo que é um concentrador mais ajustado uma fonte finita [2].

3.3.2.1 CEC como ótica terciária

Neste caso, o CEC liga a segmento T_1T_2 ao recetor R_1R_2 e, o método de corda do Hottel já não é válido (o método pressupõe que nenhum elemento ótico ligue a entrada e saída do canal ótico). O método seria válido se, por exemplo, fosse utilizada uma lente (a luz é refratada pela lente e viaja pelo ar até chegar ao recetor).

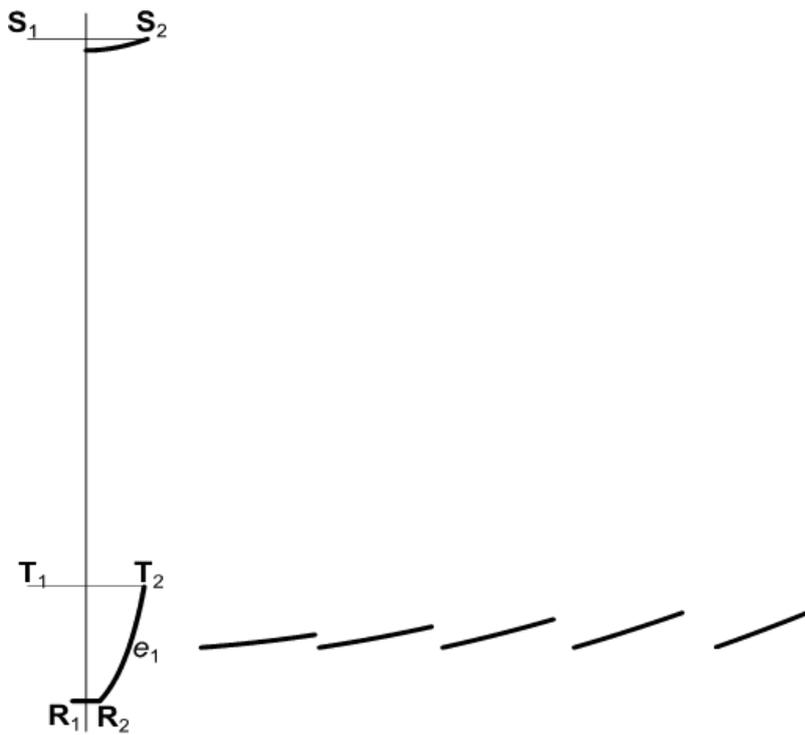


Figura 3.4: Desenho da ótica terciária CEC.

Passando então à análise da Figura 3.4, temos que o lado direito do espelho elíptico, e_1 , tem como focos S_1 e R_1 que passa em T_2 . O lado esquerdo é simétrico relativamente ao eixo vertical v . É possível que, no final, haja sobreposição entre os espelhos dos helióstatos (o mais próximo do eixo vertical v) e a ótica terciária. Neste caso, os espelhos devem ser removidos. A solução final pode ser obtida por simetria de rotação, como mostra a Figura 3.5.

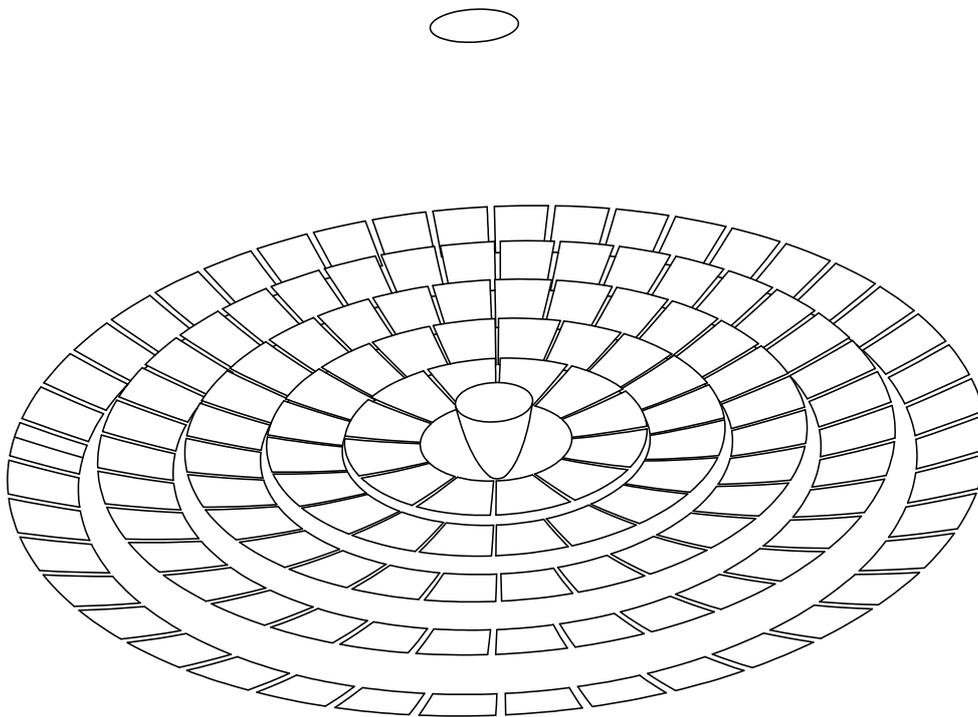


Figura 3.5: Concentrador CTR com abordagem beam down com a ótica terciária CEC.

Mas como as linhas de fluxo que conectam o secundário ao recetor são as hipérboles, podemos ter um concentrador de modelo Trompete (nome atribuído devido a sua forma) [2], como uma outra alternativa.

3.3.2.2 Trompete como ótica terciária

Sabe-se que nos sistemas CTR com abordagem beam-down, a parte superior da ótica terciária pode ser fechada por uma tampa de vidro para evitar perdas térmicas de convecção. Logo, uma possibilidade interessante é usar uma lente Fresnel como a parte superior ótica terciária, cumprindo esta tarefa. De facto, as linhas de fluxo que ligam S_1S_2 e R_1R_2 são hipérboles, como mostra a Figura 3.6.

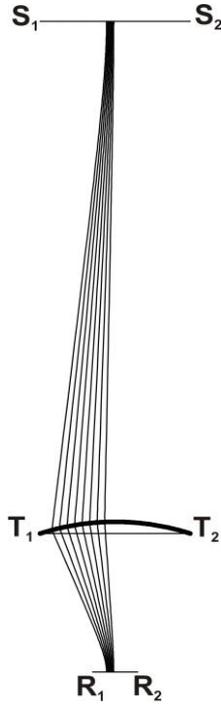


Figura 3.6: As linhas de fluxo que ligam S_1S_2 e R_1R_2 são hipérbolas.

De acordo com o método de desenho Winston-Welford [2], [3], se um elemento ótico (por exemplo, espelho, lente, etc.) for colocado ao longo das linhas de fluxo, não alterará o campo radiativo, mas também conservará o *etendue*. As linhas de fluxo também são usadas para definir as facetas da lente Fresnel. Assim, a partir do ponto T_1 (T_2 também é, naturalmente, possível) a posição e o tamanho do recetor final podem ser escolhidos. De facto, o *etendue* do recetor, $U_{R_1R_2}$, é dado por:

$$U_{R_1R_2} = 2[\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2] \sin \theta \quad (3.8)$$

Uma vez que queremos a concentração máxima, $\sin \theta = 1$ e de acordo com a conservação do *etendue* $U_{P_1P_2} = U_{R_1R_2}$. Portanto, $\mathbf{R}_1\mathbf{R}_2 = U_{P_1P_2}/2$. A posição do recetor final pode ser encontrada cruzando o raio extremo proveniente de T_1 (T_2 também é válido) com o eixo vertical v .

A configuração final é então composta pelos mesmos espelhos primários e secundários vistos antes e uma lente Fresnel, L , dois espelhos hiperbólicos, H_1 e H_2 , e um recetor plano final, \mathbf{R}_f , como mostrado na Figura 3.7.

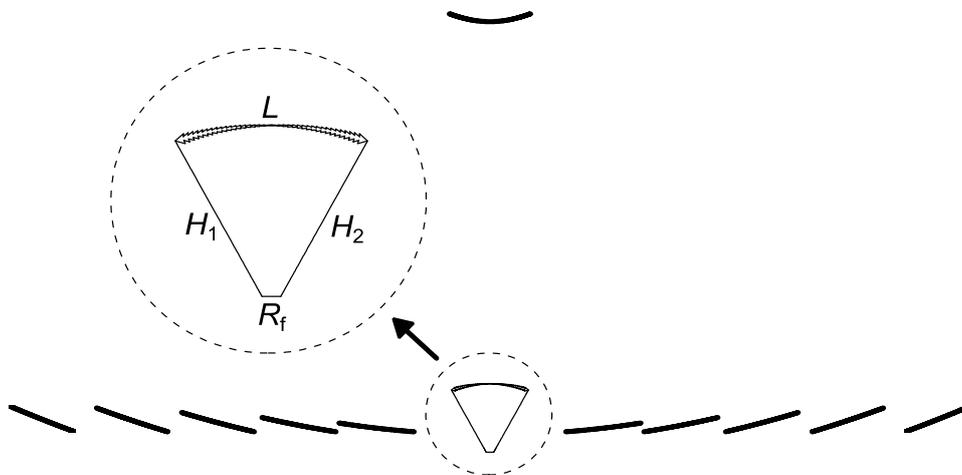


Figura 3.7: Secção transversal do concentrador CTR com abordagem beam-down utilizando uma lente Fresnel e um trompete como ótica terciária.

E a ótica completa é então obtida por simetria de rotação, como mostrado na Figura 3.8.

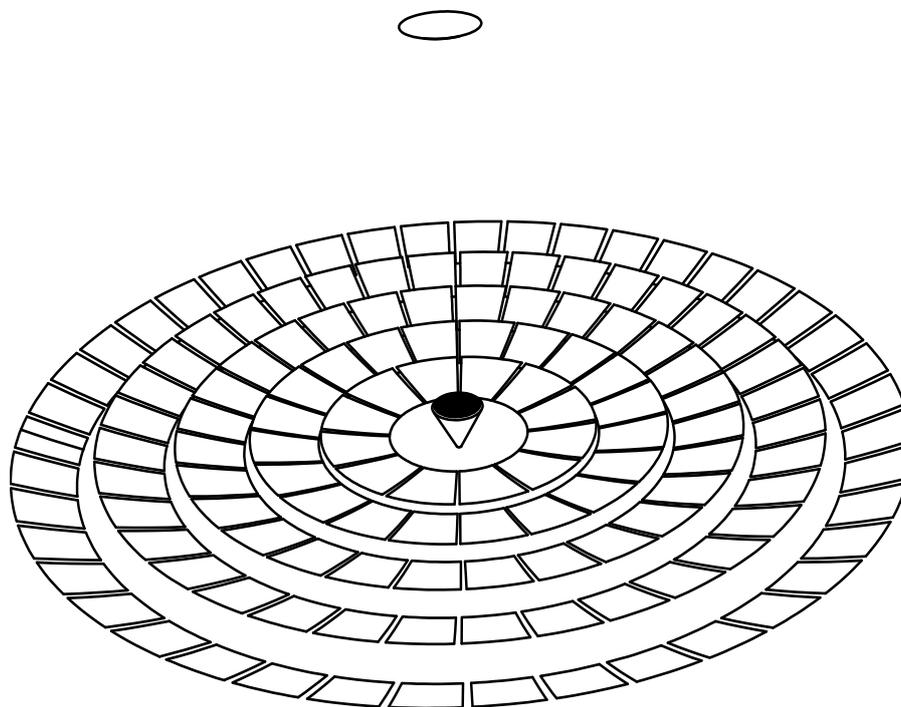


Figura 3.8: Concentrador CTR com abordagem beam down utilizando uma lente Fresnel e um Trompete como ótica terciária.

3.4 Simulação da eficiência ótica do concentrador

Para estudar o comportamento ótico do concentrador com duas óticas terciárias diferentes, foi realizada uma simulação do seu desempenho ótico. Esta simulação foi feita usando o software Tonatiuh, calculando todos os principais parâmetros óticos.

3.4.1 Tonatiuh

O Tonatiuh é um programa open source para traçar raios, que usa o método de Monte Carlo para fazer a simulação ótica dos sistemas de concentração solar [7]. Considerando a base aleatória do método Monte Carlo, é importante definir um alto número de raios gerados para obter uma boa precisão da simulação. Como demonstrado na Figura 3.9, a partir de 20 milhões de raios o erro relativo é suficientemente baixo e se tornando quase constante.

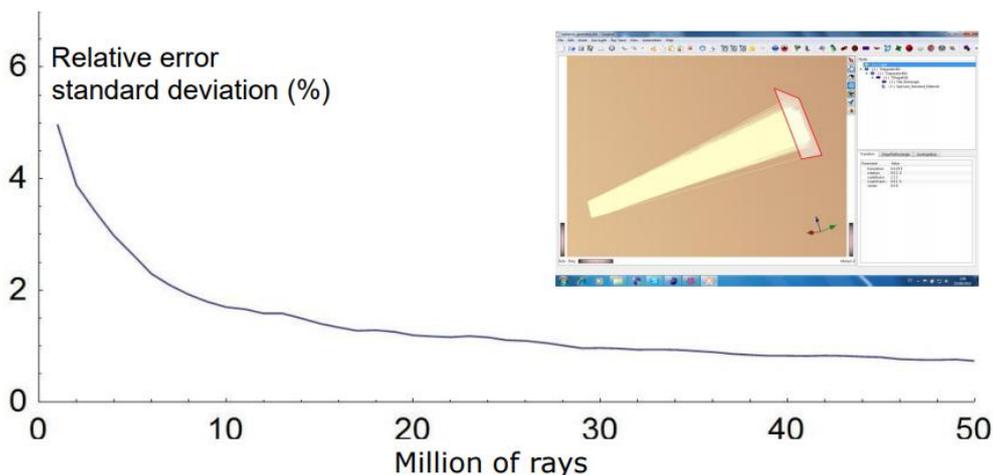


Figura 3.9: Erro relativo de Tonatiuh [17].

O Tonatiuh permite a construção de um sistema ótico detalhado com base em formas geométricas predefinidas e a análise do comportamento ótico de cada um dos subsistemas [18]. Após executar a simulação, são gerados arquivos binários que contêm informações sobre a potência de cada fóton e a sua localização na superfície em estudo. Usando uma ferramenta externa para pós-processamento, mais resultados e gráficos podem ser obtidos. O pós-processamento dos resultados foi feito usando o Python. A Figura 3.10 mostra um exemplo de tal traçado de raios.

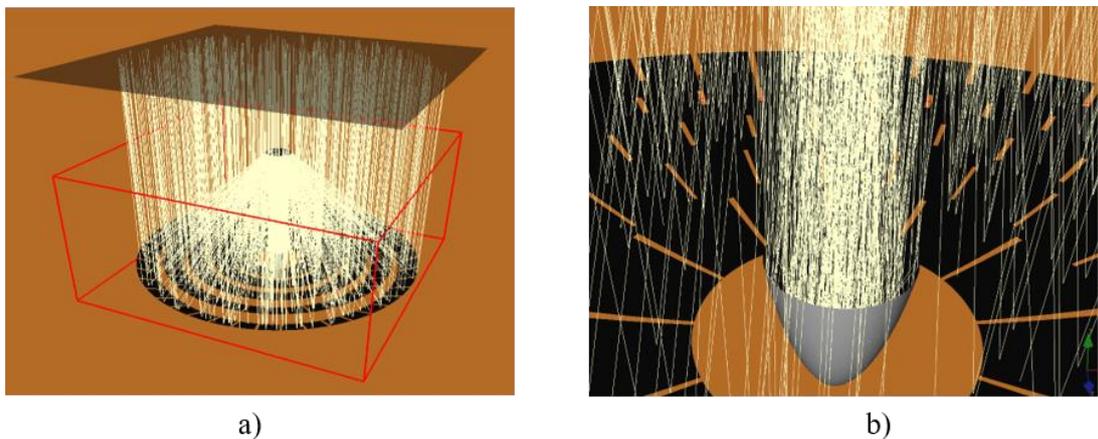


Figura 3.10: Exemplo de um traçado de raios numa ótica CTR com a bordagem beam-down. a) visão geral e b) detalhes dos raios que entram no concentrador terciário.

3.4.2 Resultados da simulação

Primeiramente, antes de qualquer comparação é importante realçar que os números apresentados na Tabela 3.1, são apenas exemplos de possíveis dimensões geométricas, não estabelecendo em absoluto as dimensões finais de cada sistema. Uma tal otimização encontra-se fora do âmbito do presente trabalho e terá lugar em futuros trabalhos, como se discutirá mais adiante.

Tabela 3.1: Dados geométricos dos concentradores CTR com a bordagem beam-down, com suas respectivas óticas terciárias.

Ótica	Refletor (m ²)	Nº de helióstatos	Altura do recetor (m)	Secundário (m ²)	Recetor (m ²)
CTR beam-down de terciário CEC	3800	139	95	38	1.78
CTR beam-down de terciário Trompette +Fresnel	3800	139	95	38	1.01

Os resultados óticos obtidos para cada sistema em estudo encontram-se na Tabela 3.2. Onde C é a concentração geométrica, que é agora definido aqui como a razão entre a irradiação média no recetor (W/m^2) e a irradiação de uma fonte uniforme que ilumina totalmente o concentrador (irradiação solar, W/m^2). Esta definição está estritamente relacionada com a abordagem de traçado de raios utilizada em Tonatiuh (para descrever a fonte de radiação utilizou-se a distribuição de Buie com um CSR (*Circumsolar ratio*) de 2% (atmosfera muito limpa) [18]). Neste cálculo específico, as propriedades do material de todos os elementos óticos devem ser ideais, ou seja, as perdas óticas do concentrador

devem-se apenas à geometria e não a características óticas como a refletividade ou a absorção. Desta forma, apenas a geometria do sistema entra em jogo e pode-se calcular quantas vezes (X) a irradiação média no recetor é maior do que a irradiação da fonte uniforme.

Por outro lado, θ_R é o semiângulo de aceitação, o ângulo de aceitação eficaz da ótica, definido como o ângulo de incidência da luz solar para o qual o concentrador recolhe 90% da potência máxima, da sua potência no eixo, mantendo os heliostatos fixos (sem rotação adicional). Esta definição é geralmente usada para todo e qualquer concentrador. E η_{opt} é a eficiência ótica na incidência normal. Os cálculos foram feitos considerando as seguintes propriedades do material: refletividade dos espelhos de 92%; transmissividade de 90% e índice de refração de 1.48 para a lente de Fresnel; e uma absorvidade de 90% do recetor.

Tabela 3.2: Desempenho ótico das óticas CEC e Trompete + lente Fresnel, como terciárias no concentrador CTR com abordagem beam down.

Ótica terciária	Recetor (m ²)	η_{opt}	C	θ_R (°)	CAP
CEC	0.14	0.67	2055	0.22	0.18
Trompete + lente Fresnel	0.024	0.46	8717	0.30	0.49

Com os resultados obtidos na Tabela 3.2, é possível observar diferentes vantagens e inconvenientes para cada sistema em estudo. Começando por analisar o sistema CTR com abordagem beam-down de ótica terciária Trompete + lente, podemos verificar que o sistema atingiu um CAP muito superior ao valor obtido com a ótica terciária CEC. Sendo que, o CAP é particularmente importante nessas configurações devido aos vários estágios óticos que, por sua vez, exigem boas tolerâncias óticas para operar dentro do desempenho esperado. A eficiência ótica da ótica Trompete + lente é, no entanto, bastante pequena e essa é a desvantagem típica de tais configurações. Isto acontece devido aos vários estágios óticos do concentrador através dos quais a luz passa e, em particular, devido às múltiplas reflexões da luz dentro do concentrador de Trompete. Para o sistema CTR com abordagem beam-down de ótica terciária CEC destaca-se a alta eficiência ótica que é bastante satisfatório, mas apresenta um CAP muito pequeno (abaixo de 0.2). Contudo, uma vez que se está a utilizar fatores de concentração bastante elevados (ver Tabela 3.2), provavelmente o CAP acaba por não ser é muito relevante, uma vez que a concentração obtida poderá ser suficiente para atingir a temperatura de operação pretendida. Nesse sentido, utilizando fatores de concentração menores (por exemplo, com uma concentração de

1200X) poderá ser suficiente para atingir as temperaturas de operação pretendidas (relação com Equação (2.17), ver Capítulo 2, secção Relação entre Temperatura e concentração).

Na prática, poder-se-á baixar a concentração do sistema de modo a que este tenha um ângulo de aceitação maiores e, portanto, tornando-se mais capaz de acomodar os erros óticos (maior tolerância à fonte efetiva que ilumina o concentrador).

Num panorama global, a diferença substancial entre as duas óticas está, neste caso, na eficiência ótica como se pode verificar na Tabela 3.2. Escolheu-se como modelo base o sistema CTR com abordagem beam-down com uma ótica terciária CEC. Esta solução também está mais em linha com o presente estado da arte, pelo que acaba por ser a escolha mais natural.

Contudo, a ótica CEC pode não ser a solução ideal para o terciário neste sistema, uma vez que o CEC toca no recetor, levando a pontes térmicas na superfície da mesma. De facto, um dos principais problemas das óticas terciárias em sistemas CTR, reside no gradiente térmico elevado entre a superfície refletora (que pela não-idealidade do material não é capaz de refletir totalmente a energia que lhe é incidente) e a superfície recetora (que pode atingir temperaturas acima de 1000°C). Esta situação pode conduzir à geração de pontes térmicas, levando à destruição dos materiais envolvidos, em particular as superfícies refletoras (espelhos).

Como já mencionado anteriormente, se colocarmos um *gap* entre a superfície refletora e a superfície recetora (ver Figura 1.3), normalmente há luz que se perde, baixando dessa forma a eficiência ótica e a concentração obtida. Por isso, seria eventualmente interessante encontrar óticas que tenham *gap* e que possam ser utilizadas como óticas terciárias. De modo a que essas óticas, consigam ser relativamente simples de construção, que tenham um alto CAP e boa eficiência ótica. Como tal, seria muito interessante o estudo sobre o mesmo.

É possível encontrar uma ótica terciária que contenha o *gap*, que não perca luz pelo *gap*, que tenha uma boa eficiência e um CAP elevado, como se explicará no Capítulo 4.

Capítulo 4

4 Concentrador SMS com *gap* e sem perdas óticas

Como analisado no capítulo anterior, o contacto entre os espelhos das óticas concentradoras e o recetor podem levar a pontes térmicas. Que acontece devido a existência de um gradiente térmico elevado entre as superfícies refletoras, que não são ideais e, portanto, absorvem parte da luz que lhes é incidente e a superfície recetora que se encontra a elevadas temperaturas devido aos elevados fatores de concentração (como explicado no Capítulo 2, secção 2.1.1), potencialmente reduzindo a sua performance térmica (deformação da geometria dos espelhos). Este fenómeno é particularmente importante em sistemas CTR devido aos elevados fatores de concentração atingidos. Uma forma simples de resolver o problema será colocar um *gap* entre as superfícies.

No entanto, tal *gap* entre a ótica concentradora e o recetor, poderá conduzir a perdas de luz e a concentração máxima não é atingida. O problema do *gap* é conhecido há muitos anos e algumas soluções foram propostas no passado como as modificações no desenho do CPC [19] e nas cavidades do espelho de ranhura [20]. Estas soluções, no entanto, tendem a levar a óticas complicadas com múltiplas reflexões que penalizam a eficiência ótica global. Por outro lado, o desenho de concentradores com *gap* é interessante, pois pode levar a um melhor desempenho pelas razões acima explicadas.

Neste trabalho é proposta uma nova abordagem utilizando o método SMS, como uma possível solução para estes problemas. A sua abordagem implica geralmente a presença de um *gap* entre a ótica e o recetor, alcançando a concentração ideal em muitos casos diferentes. Por razões que serão explicadas posteriormente, a atual solução foi desenvolvida para um recetor plano utilizando uma abordagem de dupla reflexão (X), levando ao que é conhecido como uma ótica XX SMS [2]. Neste caso, a ótica XX SMS a ser testada trata-se de um modelo desenvolvida por um conjunto de autores (no qual se incluem o Dr. Diogo Canavarro e o autor da tese), cujo resultado foi inclusive submetido como artigo na revista *Applied Optics* (ver Publicações relacionadas com a).

4.1 Desenho da ótica XX SMS em 2D

O desenho da ótica XX SMS em 2D, é feita com base nos conhecimentos adquiridos da NIO, segunda lei da termodinâmica e equações da ótica geométrica descritas no Capítulo 2. Tendo em conta que, qualquer sistema ótico deve ter uma abertura de entrada e uma de saída, define-se primeiro uma abertura P (definida entre os pontos \mathbf{P}_1 e \mathbf{P}_2) e um recetor plano R (definido entre os pontos \mathbf{R}_1 e \mathbf{R}_2), como mostrado na Figura 4.1. Considere-se que a posição P e o ângulo de aceitação θ (que pode ser obtido definindo um valor de

concentração geométrica inicial e recorrendo à Equação (2.8)) sejam conhecidas. E o receptor é considerado imerso no ar ou no vácuo (índice refrativo $n=1$). Então, o tamanho de R é dado pela equação:

$$R = P \sin \theta \quad (4.1)$$

A altura h entre P e R é representada por:

$$h = [P_1, P_2] \frac{1 + \sin \theta}{2 \tan \theta} \quad (4.2)$$

Onde $[P_1, P_2]$ é a distância euclidiana entre P_1 e P_2 . O valor de h é o mesmo do que um concentrador CPC, para um determinado valor de θ . Seria interessante usar valores mais baixos de h , pois é sabido que, para grandes fatores de concentração (ângulo de aceitação baixo) este valor tende ao infinito. No entanto, isto não é desejável nesta configuração, uma vez que é importante ter uma ótica compacta e de perfil baixo. Aqui assumimos que num concentrador ideal, o *etendue* que capturado por $P_1 P_2$ dentro de um ângulo $\pm \theta$ é igual ao *etendue* do receptor $R_1 R_2$. Tendo em conta estas razões, o valor h foi escolhido de acordo com a Equação (4.2).

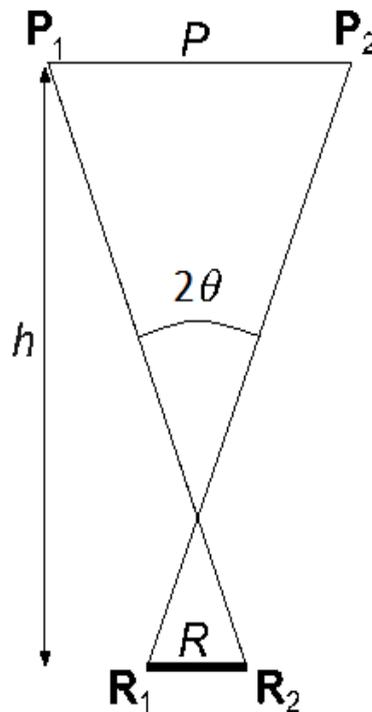


Figura 4.1: Sistema óptico de concentração. Com abertura de entrada P e abertura de saída R .

Para desenhar uma ótica SMS, começa-se sempre pela definição de feixes de raios de entrada e saída, com seus raios extremos correspondentes e frentes de onda (ver Capítulo 2, secção Ótica geométrica). Partindo então do princípio de que estamos a desenhar uma ótica XX SMS, com dois espelhos C_1C_3 e P_2P_3 , com abertura de entrada R_2P_2 , abertura de saída R_1R_2 e ângulo de aceitação θ , conforme ilustrada na Figura 4.2. Considera-se um ponto C_4 no primeiro espelho C_1C_3 . Onde, os raios extremos de entrada que cruzam a abertura de entrada R_2P_2 , alcançando C_4 são os raios r_4 até ao ponto R_2 à esquerda e r_5 até ao ponto P_2 à direita. Passando para um outro ponto C_2 no primeiro espelho C_1C_3 . Os raios extremos que chegam no ponto C_2 , são agora r_3 e r_6 aqueles até ao ponto R_2 à esquerda e P_2 à direita. No entanto, note que o raio r_3 é paralelo à r_2 no ângulo máximo de aceitação θ . Finalmente, passando a mais um ponto C_5 no primeiro espelho C_1C_3 . Os raios extremos que chegam no ponto C_5 , são os raios r_2 à esquerda no ângulo de aceitação θ e r_7 até ao ponto P_2 à direita.

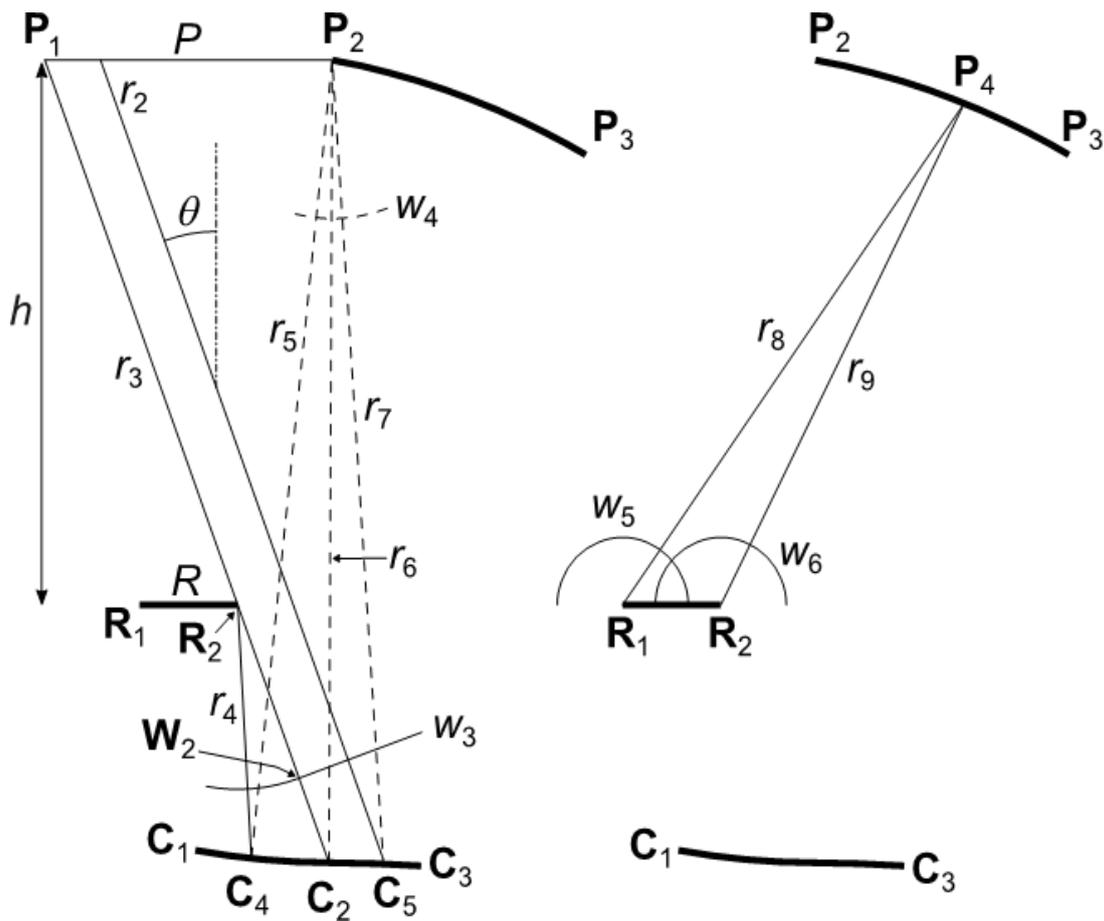


Figura 4.2: Raios extremos e frentes de ondas no desenho de ótica XX SMS.

Assim sendo, pode-se construir as frentes de ondas de entrada w_3 e w_4 perpendiculares aos raios extremos na esquerda e direita, respetivamente. A frente de onda w_3 tem duas secções: um círculo centrado em \mathbf{R}_2 à esquerda do ponto \mathbf{W}_2 e uma linha reta perpendicular aos raios r_2 ou r_3 à direita de \mathbf{W}_2 . A frente de onda w_4 é um círculo centrado em \mathbf{P}_2 .

Considerando agora um ponto \mathbf{P}_4 no segundo espelho $\mathbf{P}_2\mathbf{P}_3$. Em que, os raios extremos de saída que cruzam a abertura de saída $\mathbf{R}_1\mathbf{R}_2$, são os raios r_8 até ao ponto \mathbf{R}_1 à esquerda e o raio r_9 até ao ponto \mathbf{R}_2 à direita. Pode-se construir as frentes de onda de saída w_5 e w_6 perpendiculares aos raios extremos de esquerda e direita, respetivamente. Uma vez que, as frentes de onda de saída w_5 e w_6 são círculos centralizados em \mathbf{R}_1 e \mathbf{R}_2 , respetivamente.

Consideremos agora que o ponto \mathbf{C}_1 está ao longo da linha reta definida pelos pontos \mathbf{P}_2 e \mathbf{R}_2 . À medida que o ponto \mathbf{C}_4 se move ao longo do primeiro espelho em direção a \mathbf{C}_4 , os raios r_4 e r_5 aproximam-se um do outro, acabando por colapsar num único raio ao longo da direção $\mathbf{C}_1\text{-}\mathbf{R}_2\text{-}\mathbf{P}_2$. Por essa razão, o ângulo de aceitação no ponto \mathbf{C}_1 é zero.

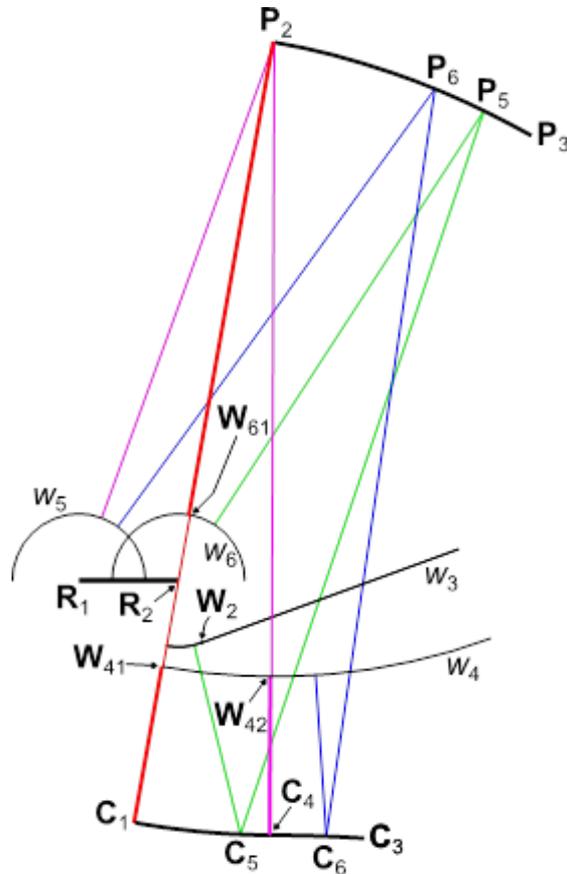


Figura 4.3: Condições iniciais da ótica XX SMS.

Deve-se agora acoplar as frentes de ondas de entrada e de saída. Este processo é ilustrado na Figura 4.3. Escolhemos primeiro a posição de C_1 ao longo da linha reta através de P_2 e R_2 . As correntes de SMS podem começar nas extremidades das superfícies óticas e iterar a partir daí. A frente de onda de entrada w_4 , é focada por $C_1 - C_4$ do primeiro espelho sobre o extremo P_2 do segundo espelho, onde reflete e se espalha sobre a gama definida por frentes de ondas w_5 e w_6 (espalhando-se por todo o recetor $R_1 R_2$). Isto define a secção $C_1 - C_4$ do primeiro espelho como um círculo centrado em P_2 .

Aplicando o mesmo procedimento ao segundo espelho, um oval cartesiano deve começar em P_2 no segundo espelho, focando a luz da frente de onda w_6 na extremidade C_1 do primeiro espelho, o que refletiria a referida luz e espalhava-a sobre o ângulo de aceitação em C_1 (definido pelas frentes de onda w_3 e w_4). No entanto, a aceitação em C_1 é zero e por isso o oval cartesiano em P_2 cai a zero.

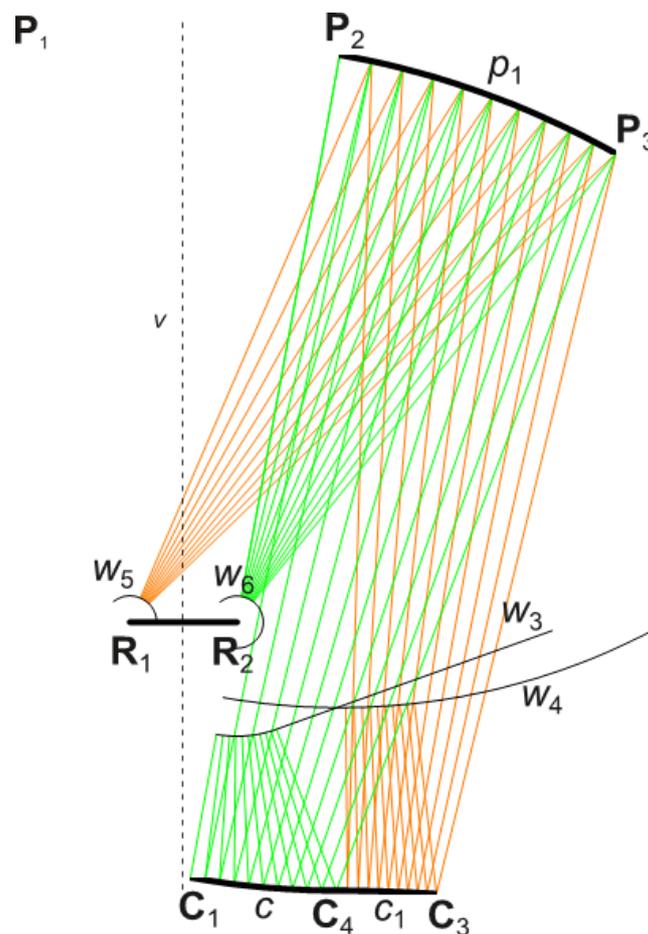


Figura 4.4: Primeira “cadeia” da ótica XX SMS.

Pode-se agora tomar um ponto C_5 na secção $C_1 - C_4$ do primeiro espelho, pegar num raio de w_3 a C_5 e calcular um novo ponto P_5 no segundo espelho, forçando o comprimento constante do caminho ótico de w_3 a w_6 . Isto define o caminho do raio $w_3 - C_5 - P_5 - w_6$. No entanto, o ponto C_5 ao longo da secção $C_1 - C_4$ do primeiro espelho e repetindo este processo permite-nos calcular uma secção $P_2 - P_3$ do segundo espelho.

Pode-se agora tomar um ponto P_6 na secção $P_2 - P_3$ do segundo espelho, pegar num raio de w_5 a P_6 e calcular um novo ponto C_6 no primeiro espelho, forçando o comprimento constante do caminho ótico de w_5 a w_4 . Isto define o caminho do raio $w_5 - C_6 - P_6 - w_4$.

Este processo é ilustrado na Figura 4.4, onde o lançamento dos raios (raios verdes) de w_3 à curva c (segundo o caminho ótico S_1 de w_3 e w_6), pode-se calcular a primeira parte superior da ótica XX SMS, p_1 , e o lançamento dos raios (raios laranja) de w_5 até p_1 (segundo o caminho ótico S_2 de w_5 e w_4) uma nova porção da parte inferior da ótica, c_1 , pode ser calculado.

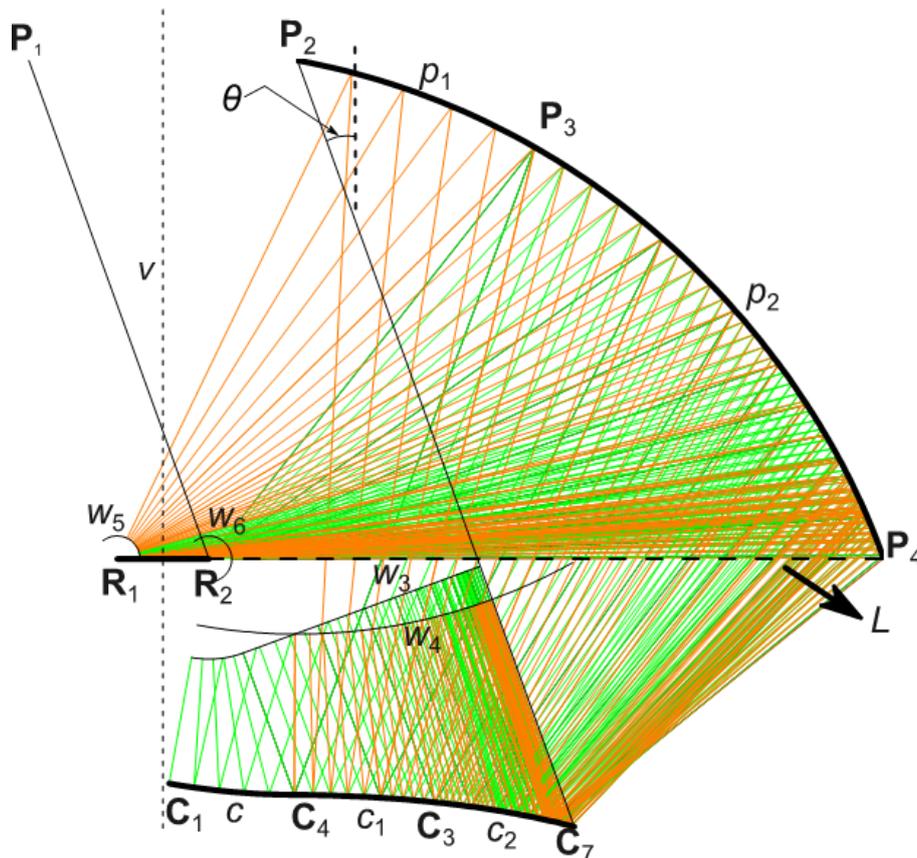


Figura 4.5: Computando as várias “cadeias”, o desenho final da ótica XX SMS é obtido. A parte superior da ótica termina no ponto P_4 , certificando que o recetor está iluminado entre $\pm\pi/2$.

Referindo-se agora à Figura 4.5, este processo continua até que a parte c_2 termine no ponto P_4 , cruzando a linha horizontal L proveniente de R_2 (garantindo que o recetor está totalmente iluminado atingindo a concentração máxima) e, ao mesmo tempo, a parte c_2 termina no ponto C_7 coincidente com o raio extremo através de P_2 , fazendo um ângulo θ em relação à vertical (certificando-se de que o espelho inferior $C_1 C_7$ também está totalmente iluminado). Isto corresponde à relação entre a entrada $R_2 P_2$ e o recetor $R_1 R_2$, uma condição essencial para atingir a concentração máxima. O *etendue* da luz que entra em $R_2 P_2$ é metade do *etendue* do recetor $R_1 R_2$ e uma ótica completa é obtida por simetria em relação à linha vertical v , como mostrada na Figura 4.6.

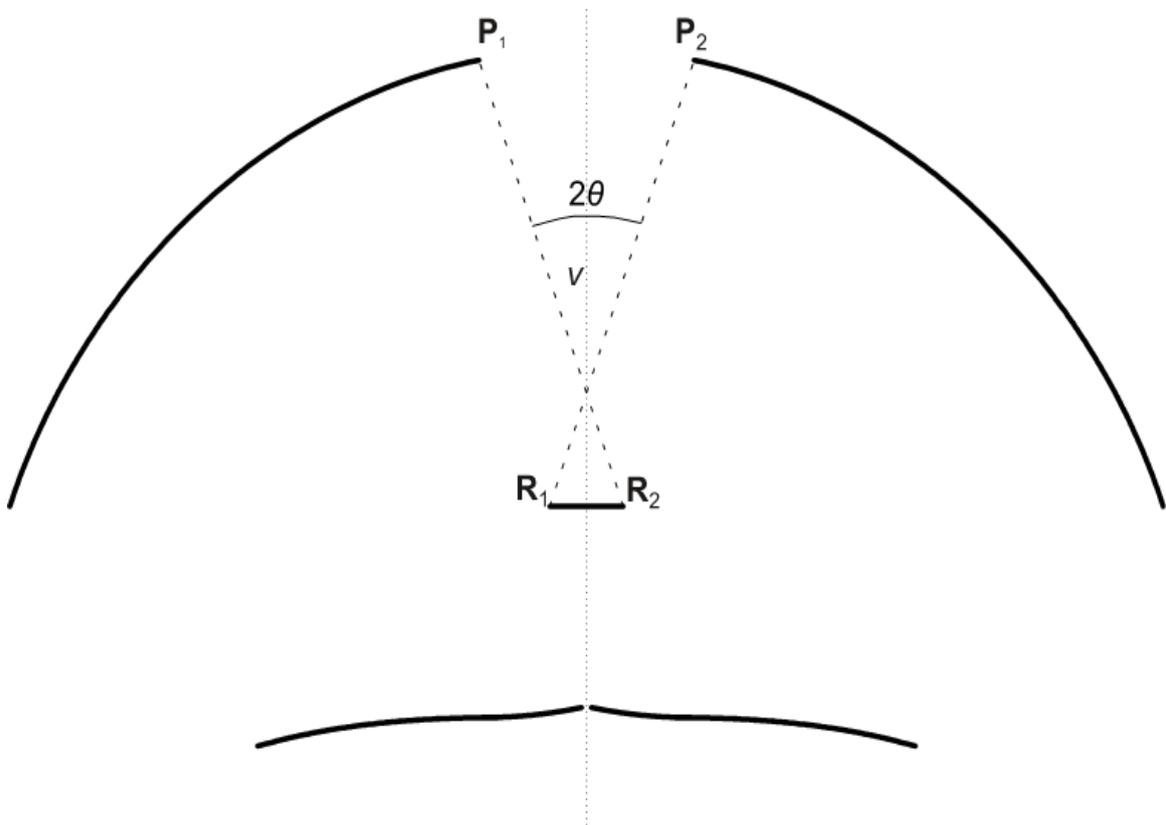


Figura 4.6: Condições finais da ótica XX SMS em 2D.

4.2 Simulação da ótica XX SMS

A fim de testar os méritos do concentrador XX SMS, a curva de aceitação de transmissão foi calculada utilizando o método de traçado de raios. Este cálculo considerou raios paralelos na entrada e materiais ideais, visando uma análise teórica do novo conceito.

4.2.1 Resultado da simulação da ótica XX SMS em 2D

As curvas de transmissão foram calculadas para três concentradores XX SMS com ângulos de aceitação de $\theta = 10^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ e 60° , sendo que os resultados são apresentados na Figura 4.7. Segundo os resultados, estas óticas praticamente alcançam a concentração máxima para diferentes ângulos de aceitação. No entanto, as curvas não são perfeitas, como o esperado. Isto acontece porque durante o processo de concepção da ótica XX SMS, ocorrem alguns *loops* nas superfícies óticas (fenómenos cústicos). A remoção dos referidos *loops* leva, no entanto, a superfícies óticas imperfeitas com um impacto indesejado nos resultados. No entanto, os resultados mostram que, apesar disso, todas as óticas consideradas alcançam 99% da concentração máxima, demonstrando que o conceito apresentado pode ser visto, para questões práticas, como um concentrador ideal.

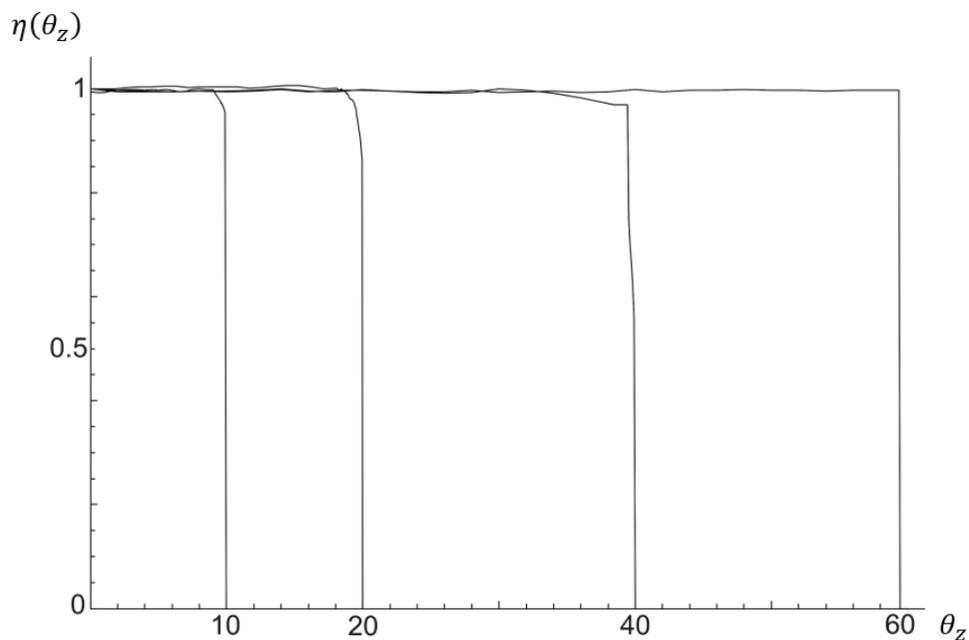


Figura 4.7: Curvas de transmissão para diferentes concentradores XX SMS em 2D, projetados para ângulos de $10^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ e 60° .

4.2.2 Resultados da simulação da ótica XX SMS em 3D

Um desenho da ótica XX SMS em 3D, para um recetor circular pode naturalmente ser obtido por simetria de rotação, como mostra a Figura 4.8.

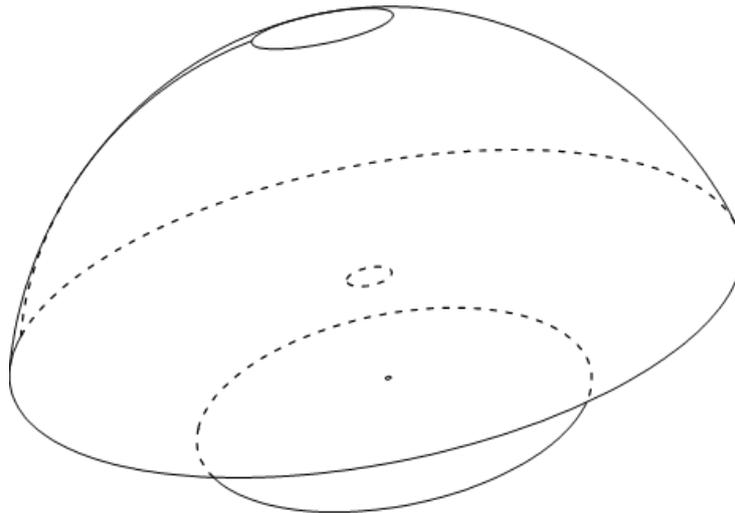


Figura 4.8: Concentrador XX SMS em 3D obtido por simetria de rotação.

Da mesma forma, as curvas de transmissão foram calculadas para três concentradores XX SMS em 3D com ângulos de aceitação de $\theta = 10^\circ, 20^\circ, 40^\circ$ e 60° , que são apresentados na Figura 4.9. Os resultados obtidos não são tão bons como os obtidos para o XX SMS em 2D (ver Figura 4.7). Isto não é, no entanto, inesperado. De facto, ocorre um fenómeno semelhante no CPC 3D, que também está próximo do ideal, mas não é ideal [2]. Alguns raios jusantes dentro do ângulo de design (aceitação) são rejeitadas pelo CPC 3D. Estes são refletidos várias vezes até acabarem por sair pela entrada do concentrador. Além disso, alguns raios fora do ângulo de design acabam por atingir a pequena abertura.

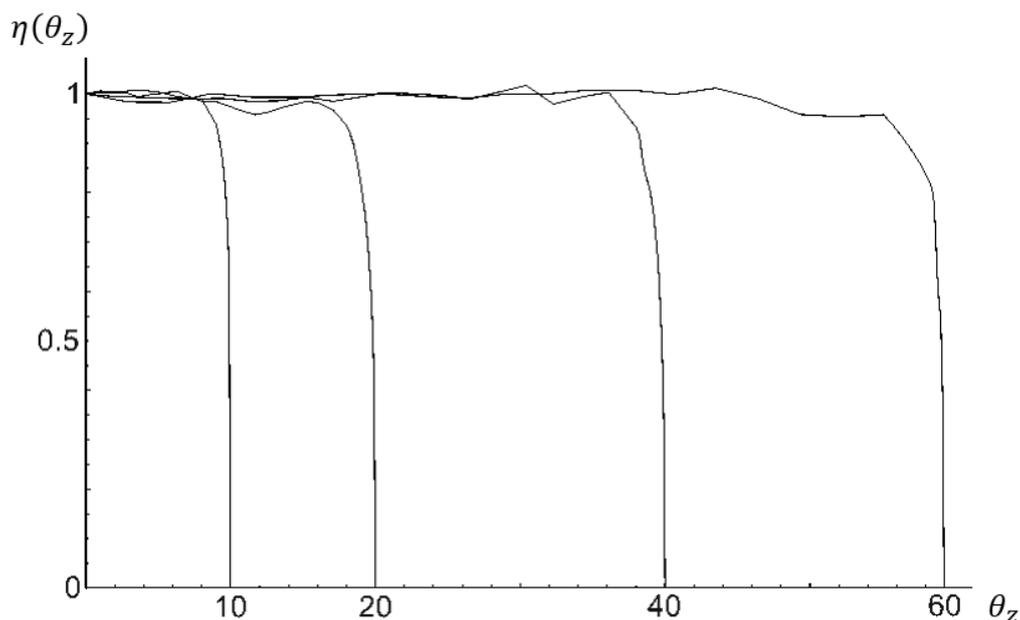


Figura 4.9: Curvas de transmissão para diferentes concentradores XX SMS em 3D, projetados para ângulos de 10°, 20°, 40° e 60°.

Assim, isto pode explicar os resultados obtidos. A Tabela 4.1 mostra uma comparação entre as versões 3D dos concentradores XX SMS e CPC.

Tabela 4.1: Comparação da perda de concentração entre os concentradores 3D XX SMS e 3D CPC.

$\theta(^{\circ})$	Ótica	
	XX SMS	CPC
10	0.93	0.96
20	0.93	0.97
40	0.96	0.98
60	0.96	0.99

Como se pode ver, os resultados do XX SMS são ligeiramente piores em comparação com os CPCs. Isto pode ser explicado pelo facto de que, embora o CPC seja uma solução analítica bem conhecida, o XX SMS é uma forma livre e, portanto, o seu comportamento pode não ser igual. Além disso, os *loops* acima referidos e a técnica de simplificação correspondente podem conduzir a ótica imperfeita. No entanto, nota-se que, à medida que θ aumenta, a perda de concentração diminui para ambos os casos. Isto acontece porque à

medida que θ aumenta, os concentradores ficam mais pequenos e mais luz atinge diretamente o recetor.

Em suma, a configuração da ótica XX SMS aqui descrito resolve o problema do *gap* discutida no início deste capítulo, sem penalizar demasiado a concentração e eficiência ótica global. Logo, esta ótica seria uma alternativa interessante a ser utilizada como ótica terciária nos sistemas CTR com abordagem beam-down. Contudo, esta ótica apresenta uma geometria que é difícil de se construir e fabricar. Como as suas óticas refletoras ficam muito distantes do recetor e por serem volumosas, torna-se muito difícil empregá-las nos sistemas CTR com abordagem beam-down. O que pode levar a uma nova otimização do dimensionamento deste sistema. E uma tal otimização encontra-se fora do âmbito do presente trabalho e terá lugar em futuros trabalhos, como se discutirá mais adiante.

Como visto anteriormente, a ótica XX SMS pode ser usada por si só como um concentrador solar para grandes ângulos de aceitação (pequeno fator de concentração). Existem, no entanto, outras possibilidades para a utilização do conceito. De modo que pode ser usada para corrigir as perdas de *gap* num concentrador de linha de fluxo, como o CPC.

Os concentradores linhas de fluxo, são consideradas concentradores ideais [1]. No entanto, para atingir a máxima concentração, a ótica deve tocar no recetor, o que pode ser um problema em muitas aplicações, especialmente nos sistemas solares térmicos devido a potenciais pontes térmicas e/ou deterioração dos espelhos.

Capítulo 5

5 Análise da ótica XX SMS no concentrador CPC

Uma das principais desvantagens dos concentradores de linhas de fluxo, é o facto de os espelhos tocarem no recetor. Na prática, isto pode levar a pontes térmicas e à deterioração dos espelhos devido às altas temperaturas de trabalho. Se for considerado/criado um *gap* entre o espelho e o recetor, haverá perdas de luz e a concentração máxima não será alcançada. No passado, foram propostas várias soluções para o controlo das perdas por *gap*. No entanto, estas óticas baseiam-se principalmente em óticas *imaging* (formadoras de imagens ou focais) e tendem a não atingir a concentração máxima.

O conceito atual de XX SMS pode ser usado para gerir as perdas de *gap* através da manipulação dos raios extremos provenientes da entrada na abertura do *gap*. O processo de conceção é muito semelhante ao apresentado no Capítulo anterior, embora haja algumas ligeiras alterações. Isto será discutido em pormenor no próximo subcapítulo.

5.1 Desenho do concentrador CPC com uma ótica XX SMS

O desenho começa pela implementação de um CPC padrão com uma entrada P (definida entre os pontos \mathbf{P}_1 e \mathbf{P}_2) para um recetor plano definido entre os pontos \mathbf{R}_1 e \mathbf{R}_2 , e trunca-lo num ponto \mathbf{T}_2 (\mathbf{T}_1 é o seu simétrico em relação à linha vertical ν), como mostrado na Figura 5.1. Agora, o *gap* $\mathbf{R}_2 - \mathbf{T}_2$ é a abertura de entrada e o recetor, $\mathbf{R}_1\mathbf{R}_2$, a abertura de saída da ótica XX SMS. Note que, quando o CPC está totalmente truncado, \mathbf{T}_2 está localizado no \mathbf{P}_2 e temos o desenho visto antes no Capítulo anterior.

O primeiro elemento ótico é a curva c (definida entre os pontos \mathbf{C}_1 e \mathbf{C}_2), utilizando o mesmo processo explicado no capítulo 4. O comprimento do caminho ótico também é o mesmo neste caso. A principal diferença é a frente de onda w_3 (representada abaixo de \mathbf{R}_2 para uma melhor visualização) que ilumina a parte inferior da ótica SMS. A frente de onda w_3 é composta por um arco circular centrado em \mathbf{R}_2 e que se estende de \mathbf{W}_1 a \mathbf{W}_2 , uma secção plana paralela a w_1 que se estende de \mathbf{W}_2 a \mathbf{W}_3 e um arco circular centrado em \mathbf{T}_2 à direita de \mathbf{W}_3 . O ponto \mathbf{W}_1 está em linha com $\mathbf{T}_2\mathbf{R}_2$. Os pontos \mathbf{W}_2 e \mathbf{W}_3 são definidos pelos raios \mathbf{r}_1 e \mathbf{r}_3 , perpendiculares à frente de onda w_1 e pelos pontos de passagem \mathbf{R}_2 e \mathbf{T}_2 . A frente de onda w_4 é circular e centrada no ponto \mathbf{T}_2 .

L proveniente de R_2 . Ao mesmo tempo, o espelho c_1 começa no ponto C_1 e termina no ponto C_2 no raio extremo r_2 (r_3 é o simétrico) proveniente de w_2 atingindo o CPC no ponto T_1 e passando por R_2 . Isto garante a correspondência do etendue visando a concentração máxima, tal como explicado no capítulo anterior. Os espelhos p_2 e c_2 , bem como os pontos T_1 , T_4 , C_3 e C_4 são simétricos em relação à linha vertical v .

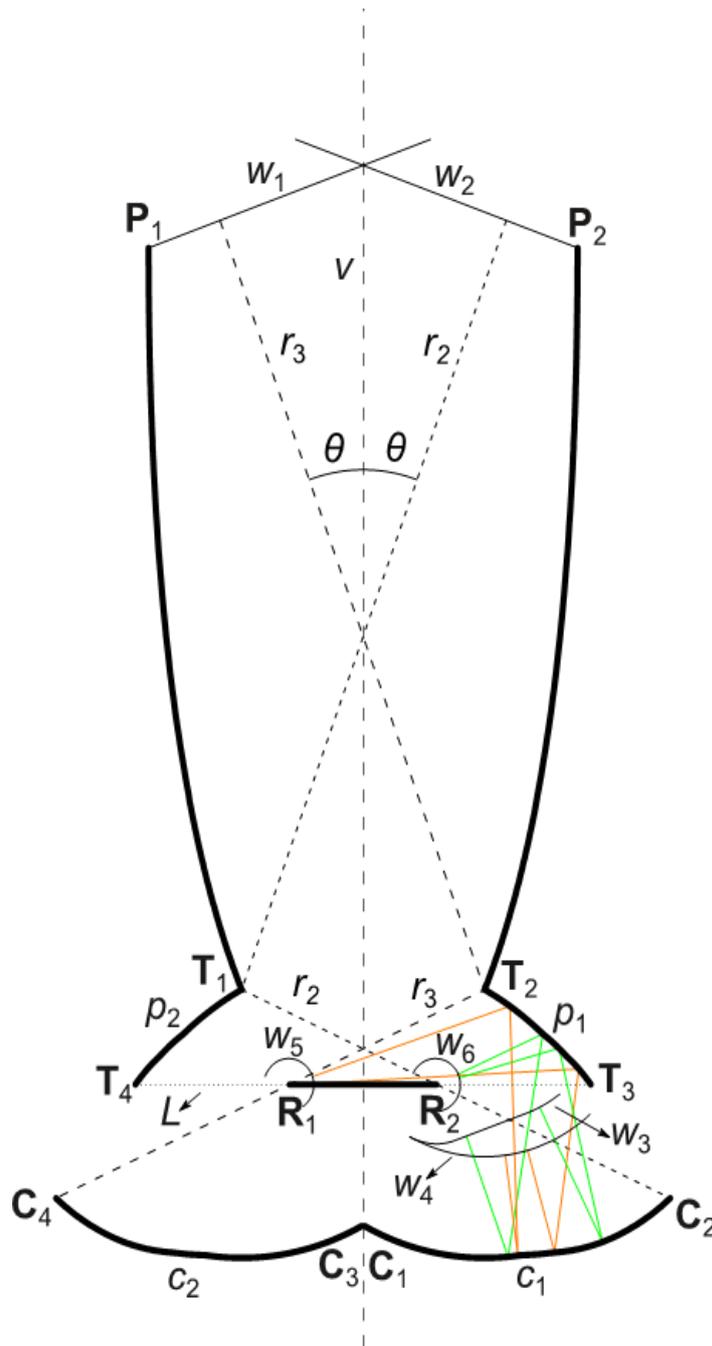


Figura 5.2: Forma final do CPC com uma ótica XX SMS para controlo de perdas de *gap*.

5.1.1 Resultados da simulação da ótica em 2D

Seguindo a mesma metodologia apresentada no Capítulo 4, as curvas de transmissão foram calculadas para três concentradores com ângulos de aceitação de 10°, 20° e 40°, respectivamente. Os resultados são apresentados na Figura 5.3.

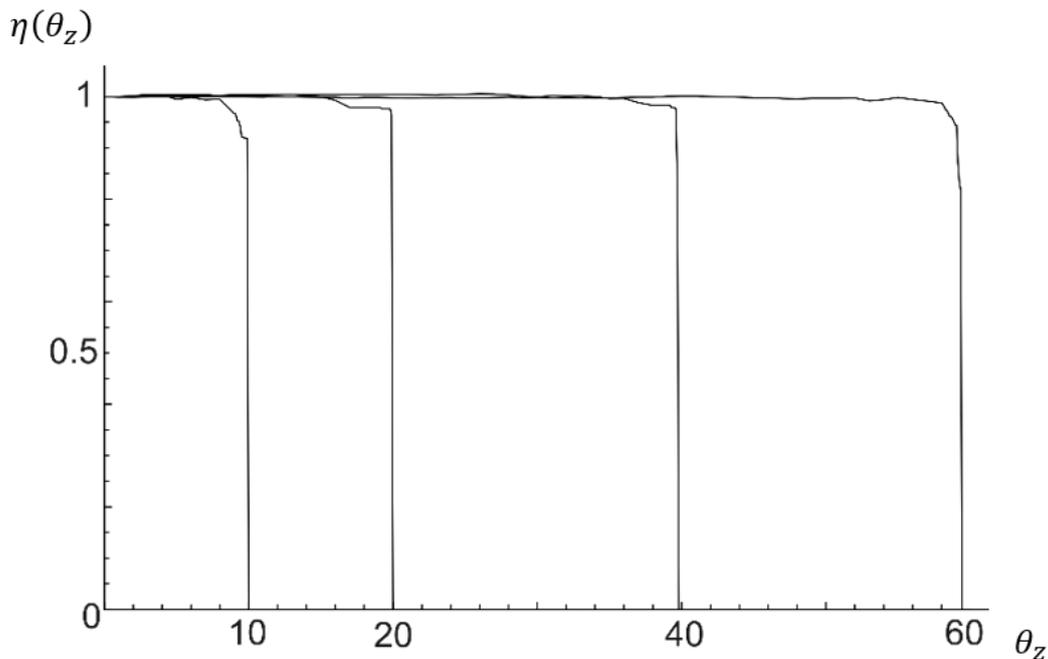


Figura 5.3: Curvas de transmissão para diferentes concentradores CPC XX SMS em 2D, projetados para ângulos de 10°, 20°, 40° e 60°.

Mais uma vez, os resultados não são uma curva perfeita em forma de passo, mas muito perto disso, com todas as óticas a atingir em 99% da concentração máxima. Aqui a curva de transmissão não cai bruscamente porque a maior parte do *etendue* é capturado pelo CPC e não pelo *gap*. Então o *gap* tem uma influência mínima no que diz respeito à curva da transmissão. Por outro lado, devido aos *loops* gerados durante o cálculo das cadeias SMS, bem como a falta de uma otimização perfeita (que teria de ser feita usando um software específico para o efeito, algo que não foi considerado neste trabalho) levam a uma solução ligeiramente pior. No entanto, pode-se dizer que esta configuração é praticamente um concentrador ideal e que foi desenvolvida uma nova forma de resolver as perdas de *gap* no concentrador de CPC em 2D.

5.1.2 Resultados da ótica em 3D

Como antes, a configuração 3D é obtida por simetria rotação da solução 2D, como se pode ser observada na Figura 5.4.

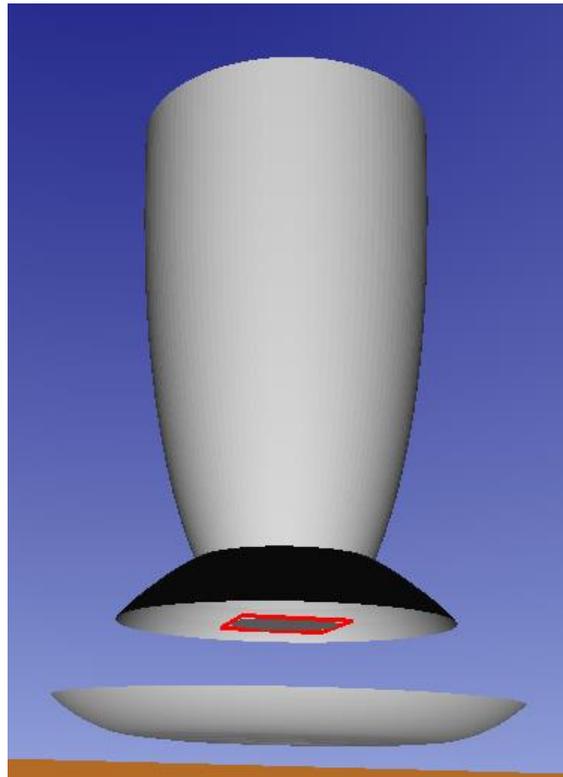


Figura 5.4: Simulação da ótica CPC XX SMS em 3D no Tonatiuh.

Para estas configurações, os resultados obtidos mostraram que estas óticas têm um comportamento não ideal, ficando aquém dos limites teóricos. Fez-se uma otimização específica usando *gap* menores (cerca de 15% do tamanho do recetor) mas, como mostra a Figura 5.5, os resultados não são satisfatórios, com todas as óticas tendo um C_{max} (concentração máxima alcançada) muito abaixo de 1.

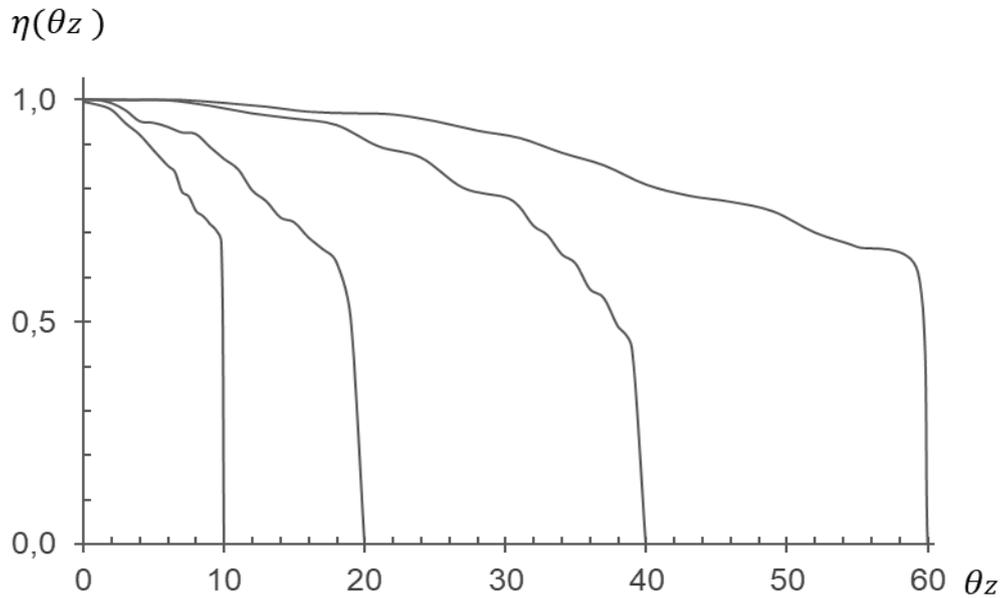


Figura 5.5: Curvas de transmissão para diferentes concentradores CPC XX SMS em 3D, projetados para ângulos de 10°, 20°, 40° e 60°.

Como se pode ver, não só a ótica está longe da concentração ideal, mas também tem um comportamento errático para diferentes ângulos de aceitação. A resposta angular não ideal não é totalmente surpreendente, uma vez que tanto o CPC como o XX SMS não são ideais em 3D e, portanto, a ótica atual também não poderia ser ideal. No entanto, os resultados são muito piores em comparação com o CPC 3D e o XX SMS 3D.

Isto sugere que a otimização destes dispositivos deve ser feita usando eventualmente outras técnicas, uma vez que a simples otimização em 2D seguida da construção utilizando a simetria de rotação pode não ser suficiente. Uma possível explicação para este fenómeno pode depender da não conservação da *skewness* do sistema [2]. No entanto, um tal estudo ultrapassaria claramente o âmbito do presente trabalho e, por conseguinte, será estudado em futuros trabalhos.

5.2 Utilização do CPC com *gap* em sistemas CTR com abordagem beam-down como ótica terciária

Como mencionado no Capítulo 3, os sistemas CTR com abordagem beam-down baseiam-se em óticas terciários do tipo CPC, que liga o segmento T_1T_2 ao recetor R_1R_2 (ver Figura 3.1). No entanto, foi escolhido anteriormente o concentrador do tipo CEC como modelo base do terciário neste sistema, no âmbito do presente trabalho, por ser o concentrador mais ajustado para fontes finitas. Todavia, pese embora não ter sido realizada uma análise do CPC como terciário, utilizar este ou um CEC como terciário neste sistema resulta sempre no mesmo problema do elevado gradiente térmico entre a superfície refletora e recetora, que potencialmente reduz a sua performance ótica (deformação da geometria dos espelhos) e térmica para as duas alternativas. No entanto, uma solução para este problema foi proposta no Capítulo 4, com a utilização do *gap* entre a superfícies refletora e recetora através do uso de uma ótica XX SMS (ver Figura 4.6).

Como se viu na secção anterior, a ótica XX SMS foi usada para corrigir as perdas de *gap* num concentrador de linha de fluxo. O resultado anterior obtido mostrou-se relativamente satisfatória, em que se utilizou um CPC. É uma solução de base e que foi usada para a aplicação das óticas XX SMS apresentadas. O CPC, embora não ideal para fontes finitas, é, contudo, bastante aproximado ao CEC. Está mais em linha com estado da arte, nomeadamente com o sistema beam-down comerciais (MASDAR)[6]. Nesse sentido, foi realizada uma adaptação de um CPC XX SMS (ver Figura 5.4) para o concentrador beam-down considerado neste trabalho, como se mostra na Figura 5.6.

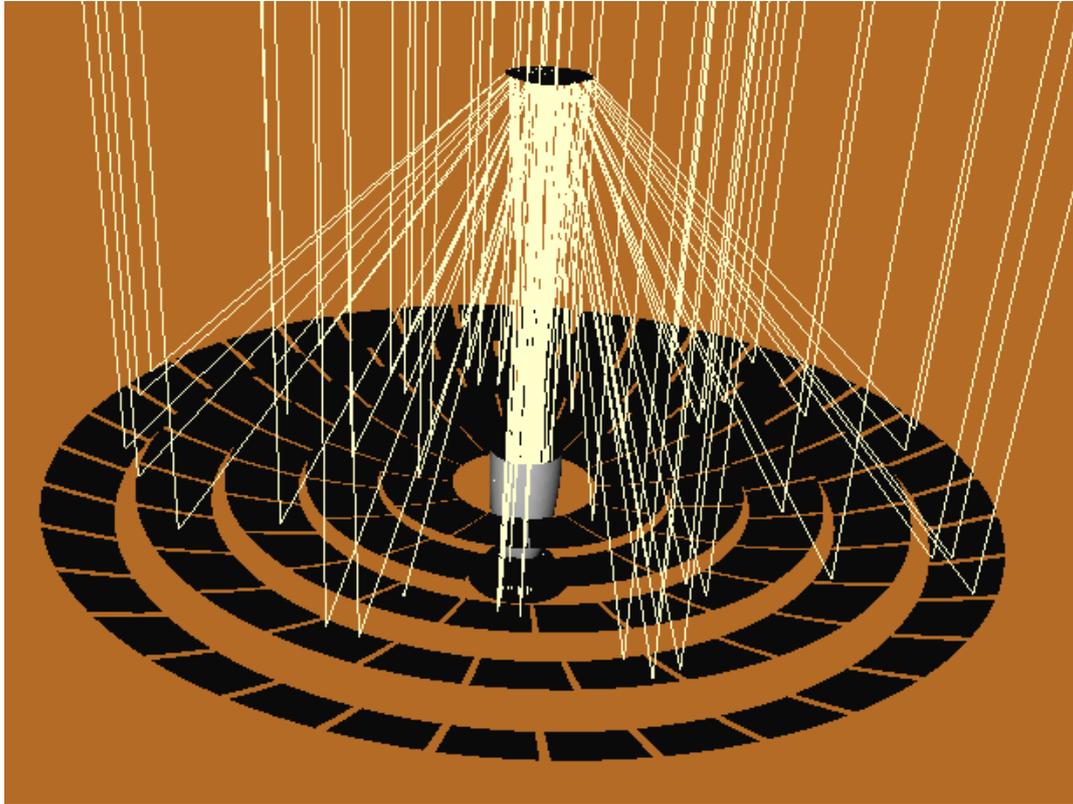


Figura 5.6: Concentrador CTR com abordagem beam down com a ótica terciária CPC XX SMS.

O trabalho nos Capítulos 4 e 5 foram muito exigentes e, portanto, revelou-se mais prático utilizar este resultado diretamente, como forma também de testar a sua performance, méritos, etc. Com isso, realizou-se um estudo comparativo entre um concentrador CPC padrão CPC XX SMS (CPC *gap*), como uma ótica terciária no sistema CTR com abordagem beam-down.

5.2.1 Simulação da performance ótica

A simulação da ótica foi feita usando o Tonatiuh, onde se simulou o mesmo sistema beam-down já apresentado (ver Capítulo 3), com as óticas terciárias CPC e CPC *gap*. O pós-processamento dos resultados foram efetuadas em Python, de modo a saber a irradiação da fonte que ilumina o concentrador e o fluxo capturado pelo receptor. Nesta simulação, foram consideradas as seguintes propriedades do material: refletividade dos espelhos de 92%; e uma absortividade de 90% do receptor. As condições da simulação e a forma como se determinou os parâmetros óticos, são as mesmas utilizadas no Capítulo 3.

Tabela 5.1: Desempenho ótico das óticas CPC e CPC *gap*, como terciárias no concentrador CTR com abordagem beam down.

Ótica	Receptor (m ²)	η_{opt}	C	θ_R (°)	CAP
CPC	0.29	0.68	1011.4	0.22	0.12
CPC <i>gap</i>	0.29	0.64	982.2	0.22	0.12

Os resultados da simulação ótica encontram-se na Tabela 5.1. Os resultados obtidos permitem, numa primeira análise, verificar que com a ótica terciária CPC os valores da eficiência ótica e da concentração geométrica são superiores aos da ótica CPC *gap*, o que se justifica pela presença do *gap* (com 15% do tamanho do recetor) entre os espelhos e o recetor, diminuindo assim a irradiação média no recetor (W/m^2). No entanto, esta perda relativamente a concentração geometria é sensivelmente 3% face ao da ótica CPC sem *gap*. Considerando a geometria das duas óticas, as dimensões do concentrador são as mesmas, sendo que a única diferença está numa pequena abertura do *gap* entre o recetor e o espelho da ótica CPC *gap*. O baixo valor desta penalização da concentração é bastante satisfatório. Por outro lado, a diferença entre a eficiência ótica das duas ótica é de apenas 4%. Esta perda, que se pode considerar relativamente pequena face ao *gap* utilizado, pode eventualmente ser compensada por uma melhoria da performance térmica do sistema (evitando as pontes térmicas) e na durabilidade do próprio terciário. Uma tal análise ficou, contudo, fora do âmbito deste trabalho.

Quanto ao CAP, os resultados obtidos das óticas são similares, representando assim um desempenho significativo da ótica CPC *gap* no sistema beam-down. Contudo, a adaptação destas óticas terciárias ao sistema já existente, levou a uma baixa do valor geral de concentração. Todavia, isto não se coloca como um problema na presente análise pois o objetivo não passa pela comparação entre este sistema beam-down com os anteriores, mas antes ver o impacto da aplicação do CPC *gap* nos resultados desta ótica.

Importa também salientar que esta adaptação de um beam-down existente a um CPC com *gap* proveniente de outro trabalho pode não originar uma solução totalmente otimizada.

No geral, estes resultados podem naturalmente ainda ser melhores se for utilizando um *gap* menor.

Capítulo 6

6 Conclusões e perspectivas de melhoramento

6.1 Conclusões

Os objetivos principais do presente trabalho foram concluídos com sucesso. Foi possível concluir que a conservação do *etendue* (através do método das cordas de Hottel) é uma ferramenta importante na otimização de concentradores do tipo torre solar com abordagem beam-down. Todavia, esta otimização, realizada em 2D, poderá não ter um impacto tão elevado quanto desejado na solução final em 3D, solução essa obtida a partir da simetria de rotação. Tal fenómeno poderá estar relacionado com a não-conservação da *skewness* do sistema. De facto, as óticas são desenhadas num plano meridional e depois passadas para o plano sagital por rotação em torno do eixo ótico. Esta abordagem, necessária por razões práticas, pode levar ao não-acoplamento dos raios extremos em ambos os planos, o que poderá reduzir a performance do sistema (CAP).

Foi apresentado um novo concentrador do tipo XX SMS. Esta ótica pode ser usada por si só como um concentrador solar para grande ângulo de aceitação (fator de baixa concentração), com a vantagem de utilizar um *gap* entre os espelhos e o recetor, evitando potenciais pontes térmicas. Os resultados obtidos mostraram que estas óticas praticamente alcançam a concentração máxima, apresentando uma curva quase perfeita “em forma de passo” para diferentes ângulos de aceitação. A respetiva versão 3D desta ótica, alcançada por simetria de rotação, está muito perto de ser ideal tendo um comportamento semelhante ao CPC 3D que também não é ideal. Esta técnica também pode ser usada para gerir as perdas de *gap* nos concentradores de CPC sem perder a concentração. Além de ser uma novidade teórica, esta pode ser útil na prática para muitas aplicações na energia solar usando fatores de baixa concentração. Os resultados obtidos mostraram novamente que estas óticas praticamente alcançam a concentração máxima para diferentes ângulos de aceitação. A versão 3D, no entanto, tem um comportamento errático, ficando aquém do limite teórico. As razões estão relacionadas novamente pela simplificação na obtenção da versão 3D (simetria de rotação).

Por último, estudou-se a aplicação de um CPC XX SMS numa torre solar com abordagem beam-down. Os resultados mostram que este novo terciário tem perdas de eficiência e CAP relativamente baixas face à solução em *gap* (que poderão ser ainda menores se forem aplicados *gaps* menores e/ou otimização do sistema), permitindo afirmar que se tem uma possível solução para o problema central deste trabalho: ter óticas terciárias com *gap* em

sistemas deste género, evitando potencialmente pontes térmicas. Esta análise é ainda bastante inicial, sendo naturalmente ainda necessários novos estudos que comprovem a viabilidade prática deste tipo de soluções.

6.2 Perspetivas futuras

Como perspetivas futuras, poderão ser apontados os seguintes tópicos e trabalhos:

- Otimização ótica de centrais de torre com óticas terciárias com *gap*;
- Análise da performance ótica e térmica anual de sistemas centrais de torre para localizações específicas;
- Relação custo-benefício de óticas *gap*;
- Introdução de óticas SMS como lentes Kohler [2], para uma distribuição de irradiância no recetor mais uniforme.

Em particular, é expectável que os sistemas beam-down possam ter um papel relevante nas aplicações relacionadas com a produção combustíveis solares, produção de hidrogénio ou calor de processo para a indústria, etc. E sendo ainda plausível o ensaio experimental de sistemas deste género na Universidade de Évora, através da Cátedra Energias Renováveis e da sua infraestrutura INIESC (Infraestrutura Nacional de Investigação em Energia Solar de Concentração) [21].

Referências

- [1] A. Rabl, *Active Solar Collectors and Their Applications*. 1985.
- [2] J. Chaves, *Introduction to Nonimaging Optics*. CRC Press, 2017.
- [3] R. W. J. M. P. B. W. contributions by N. S. and J. C. B. Winston, *Nonimaging Optics*. Elsevier, 2005.
- [4] NEWSOL, “CSP Concentrated Solar Power.” [Online]. Available: <http://www.newsol.uevora.pt/technology-csp/>. [Accessed: 21-Feb-2020].
- [5] S. A. Miller, “To beam or not to beam down,” *ISES Sol. World Congr. 2017 - IEA SHC Int. Conf. Sol. Heat. Cool. Build. Ind. 2017, Proc.*, pp. 146–157, 2017.
- [6] M. B. Mokhtar, “The Beam-Down Solar Thermal Concentrator: Experimental Characterization and Modeling,” pp. 1–117, 2011.
- [7] Tonatiuh, “A Monte Carlo ray tracer for the optical simulation of solar concentrating systems.” [Online]. Available: <https://code.google.com/archive/p/tonatiuh/>. [Accessed: 23-Apr-2020].
- [8] D. Canavarro, J. Chaves, and M. Collares-Pereira, “Simultaneous Multiple Surface method for Linear Fresnel concentrators with tubular receiver,” *Sol. Energy*, vol. 110, pp. 105–116, 2014.
- [9] G. C. Vliet, *Principles of Solar Engineering*, vol. 122, no. 2. 2000.
- [10] A. Rabl, “Tower reflector for solar power plant,” *Sol. Energy*, vol. 18, no. 3, pp. 269–271, 1976.
- [11] D. Canavarro, J. Chaves, and M. Collares-Pereira, “Simultaneous multiple surface method for the design of new parabolic dish-type concentrator using a Cassegranian approach,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2126, 2019.
- [12] J. M. G. D. Feuermann, “Analysis of a Two-Stage Linear Fresnel Reflector Solar Concentrator,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 113, pp. 272–279, 1991.
- [13] D. Canavarro, J. Chaves, and M. Collares-Pereira, “New dual asymmetric CEC linear Fresnel concentrator for evacuated tubular receivers,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1850, no. June, 2017.
- [14] J. Chaves and M. Collares-Pereira, “Etendue-matched two-stage concentrators with multiple receivers,” *Sol. Energy*, vol. 84, no. 2, pp. 196–207, 2010.
- [15] J. M. Gordon, “Aplanatic optics for solar concentration,” *Opt. Express*, vol. 18, no. S1, p. A41, 2010.
- [16] L. Vant-Hull, “Issues with beam-down concepts,” *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 257–264, 2013.
- [17] Manuel J. Blanco, “Status of Tonatiuh as of July 2011.” [Online]. Available: <https://www.slideshare.net/manueljblanco/status-of-tonatiuh-as-of-july-2011>.

[Accessed: 23-Apr-2020].

- [18] T. Osório *et al.*, “Ray-tracing software comparison for linear focusing solar collectors,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1734, 2016.
- [19] J. C. and M. Collares-Pereira, “Ideal concentrators with gaps,” *Appl. Opt.*, vol. 41, no. 7, pp. 1267–1276, 2002.
- [20] R. Winston, “Cavity enhancement by controlled directional scattering,” *Appl. Opt.*, vol. 19, pp. 195–197, 1980.
- [21] University of Évora (UEvora) and the National Laboratory for Energy and Geology (LNEG), “NATIONAL RESEARCH INFRASTRUCTURE IN SOLAR ENERGY CONCENTRATION.” [Online]. Available: https://www.en.catedraer.uevora.pt/about/iniesc_en. [Accessed: 26-Jun-2020].