

ERICK ALFRED DIB

**ESTUDO COMPARATIVO DAS CARACTERÍSTICAS TEÓRICAS DE
COLETORES SOLARES CONCENTRADORES E DESCRIÇÃO DE
MODELOS COMERCIAIS PARA APLICAÇÃO EM PROCESSOS
INDUSTRIAIS.**

**São Paulo
2013**

ERICK ALFRED DIB

**ESTUDO COMPARATIVO DAS CARACTERÍSTICAS TEÓRICAS DE
COLETORES SOLARES CONCENTRADORES E DESCRIÇÃO DE
MODELOS COMERCIAIS PARA APLICAÇÃO EM PROCESSOS
INDUSTRIAIS.**

**Monografia apresentada ao Programa
de Educação Continuada em
Engenharia da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Especialista em
Energias Renováveis, Geração
Distribuída E Eficiência Energética.**

**São Paulo
2013**

ERICK ALFRED DIB

**ESTUDO COMPARATIVO DAS CARACTERÍSTICAS TEÓRICAS DE
COLETORES SOLARES CONCENTRADORES E DESCRIÇÃO DE
MODELOS COMERCIAIS PARA APLICAÇÃO EM PROCESSOS
INDUSTRIAIS.**

**Monografia apresentada ao Programa
de Educação Continuada em
Engenharia da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Especialista em
Energias Renováveis, Geração
Distribuída E Eficiência Energética.**

**Área de concentração:
Engenharia Mecânica**

**Orientador: Prof. Dr. Cláudio Roberto
De Freitas Pacheco**

**São Paulo
2013**

O estudo é a luz da vida
(José Dib)

RESUMO

Inicialmente foi exposta uma revisão da literatura sobre as diferenças entre os concentradores pela geometria e razão de concentração, sendo considerado desempenho térmico e óptico do coletor. Também foi discorrida a relação entre a razão de concentração e a segunda lei da termodinâmica. Depois foi feito um levantamento de alguns modelos de coletores concentradores solares que são comercializados. Ao final, foi realizada uma comparação entre o modelo parabólico de foro linear de dois fabricantes, e foi visto que a diferença entre as eficiências térmicas de cada coletor chega a 22%.

ABSTRACT

Initially it was exposed a literature review about the differences between the concentrator by its geometry and concentration ratio, optical and thermal performance of the collector were considered. It was also analyzed the relationship between the concentration ratio and the second law of thermodynamics. Was made a comparison between some models collectors solar concentrators, like trough and Fresnel concentrators, that are marketed. Ultimately, a comparison was performed between the parabolic trough type, and it was seen that the difference between the thermal efficiencies of each collector reaches 22%.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Consumo de energia em faixa de temperatura de alguns setores industriais (VANNONI et al. , 2008).	2
Figura 2.1 Perfis de concentradores: a) Absorvedor tubular com refletor difuso; b) absorvedor tubular com refletor especular; c) receptor plano com refletor plano; d) concentrador parabólico; e) refletor fresnel e; f) heliostatos com receptor central (DUFFIE e BECKMAN, 2006).	6
Figura 2.2 - Transferência de radiação do Sol (S) através da abertura (A) do cocentrador solar para o Absorvedor (A_{abs}) (RABL, 1976).	7
Figura 2.3 - perfil de concentrador parabólico e a área focal (RABL, 1976).	10
Figura 2.4 - Relação entre taxa de concentração e temperatura no receptor (DUFFIE e BECKMAN, 2006).	13
Figura 2.5 Variação do coeficiente de perdas térmicas com o gradiente de temperatura do receptor (DUFFIE e BECKMAN, 2006).	15
Figura 2.6 Exemplo de distribuição do fluxo de radiação no receptor plano de um concentrador formador de imagem linear (DUFFIE e BECKMAN, 2006).	17
Figura 2.7 Esquema ilustrativo do fluxo de calor em absorvedores tubulares generalizados (KARIMI et al. , 1986 apud KALOGIROU, 2009).	18
Figura 2.8 Dois tipos de tubo evacuado de Dewar com absorvedores cilíndricos: (a) com tubo interno, e (b) com aleta absorvedora (THEUNISSEN e BECKMAN, 1985 apud DUFFIE e BECKMAN, 2006).	19
Figura 2.9 Coletor com matriz de receptores cilíndricos e refletor difuso atrás (DUFFIE e BECKMAN, 2006).	19
Figura 2.10 Tipos de absorvedores do CPC (KALOGIROU, 2009).	20
Figura 2.11 - Esquema do Concentrador Solar tipo CPC (DUFFIE e BECKMAN, 2006).	21
Figura 2.12 - Fração da radiação incidente na abertura do concentrador à θ_{in} que alcança o absorvedor, para concentradores ideais (RABL, 1976).	22
Figura 2.13 Esquema de painel de CPC (KALOGIROU, 2009).	22
Figura 2.14 Esquema de painel de CPC (DUFFIE e BECKMAN, 2006).	23
Figura 2.15 Representação esquemática dos ângulos de admissão da placa de CPC (DUFFIE e BECKMAN, 2006).	24

Figura 2.16 Estimativa do coeficiente global de perdas, U_L , para coletores CPC com placas absorvedoras (RABL, 1976b apud DUFFIE e BECKMAN, 2006).	24
Figura 2.17 - Perfil do concentrador calha em V (RABL, 1976)	25
Figura 2.18 - Distribuição angular da incidência de radiação no concentrador calha em V (RABL, 1976)	26
Figura 2.19 Perfil de concentrador Fresnel com um concentrador secundário tipo CPC próximo à zona focal (RABL, 1976)	27
Figura 2.20 Concentração do receptor central com e sem concentrador de segundo estágio. A linha sólida representa o concentrador CPC em segundo estágio. A linha traço ponto representa o calha em V como segundo estágio. A linha tracejada representa o absorvedor plano. E a linha pontilhada representa o absorvedor esférico (RABL, 1976).	28
Figura 2.21 - Concentrador parabólico tipo calha parabólica (DUFFIE e BECKMAN, 2006)	30
Figura 2.22 Seção de um concentrador solar parabólico linear na coordenada x,y,z. (DUFFIE e BECKMAN, 2006).	31
Figura 2.23 Seção de um concentrador solar parabólico linear na coordenada x,y,z. (DUFFIE e BECKMAN, 2006).	31
Figura 2.24 Esquema da radiação refletida da borda do concentrador incidente em um absorvedor de perfil circular, de perfil semicircular e de perfil plano (DUFFIE e BECKMAN, 2006).	32
Figura 2.25 a) Distribuição da concentração na imagem para concentrador com refletor ideal e disco solar não uniforme, e b) Fator de interceptação para o mesmo concentrador (DUFFIE e BECKMAN, 2006).	33
Figura 2.26 Distribuição da imagem de concentradores com ângulos de borda de a) 30° e b) 75°, com refletores imperfeitos para vários desvios padrões dos erros da superfície do refletor (DUFFIE e BECKMAN, 2006).	35
Figura 2.27 Esquema da incidência da radiação solar com abertura de 32' e da reflexão do espelho com a dispersão δ somada à abertura do cone (DUFFIE e BECKMAN, 2006).	35
Figura 2.28 Diagrama Ray Trace para o coletor CPC (DUFFIE e BECKMAN, 2006).	36
Figura 2.29 - Concentrador solar tipo Scheffler (SCHEFFLER, 2010)	38
Figura 2.30 - Coletor concentrador solar de receptor central.	39
Figura 2.31 Forno de Odeillo (Wikipedia: acessado em 12/12/12).	40
Figura 3.1 Coletor concentrador parabólico linear PARASOL (IEA, 2005).	41

Figura 3.2 Comparativo entre resultados experimentais (pontos quadrados), e numericamente com o receptor evacuado (linha pontilhada) e com o receptor sem vácuo (linha) (IEA, 2005).	42
Figura 3.3 SOLITERM PTC 1800 (IEA, 2005).	43
Figura 3.4 SOLITERM PTC 1000 (IEA, 2005).	43
Figura 3.5 Comparativo entre análise teórica e experimental (IEA, 2005).	44
Figura 3.6 Coletor concentrador parabólico FASOL (IEA, 2005).	44
Figura 3.7 Coletor concentrador Fresnel, construído por Heinrich (IEA, 2005).	45
Figura 3.8 Coletor concentrador Fresnel, fornecido pela Solarmundo (IEA, 2005).	46
Figura 4.1 Estimativa média da radiação solar global no plano horizontal em um ano (PEREIRA et al. , 2006).	48
Figura 4.2 Estimativa média da radiação solar global no plano horizontal para cada estação do ano (PEREIRA et al. , 2006).	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Custo de geração de energia elétrica em algumas formas de conversão de energia.	3
Tabela 2.1 - Comparação entre o coletor concentrador modelo CPC e a calha com perfil em V (RABL, 1976).	26
Tabela 3.1 Relação entre modelos de concentradores solares	46
Tabela 4.1 Incidência diária de radiação solar no dia médio de cada mês, H.	50
Tabela 4.2 Radiação solar direta incidente no plano da área de abertura do concentrador solar em um dia médio de cada mês.	52
Tabela 5.1 Comparação entre as eficiências dos coletores PARASOL e SOLITEM	55
Tabela 5.2 Comparação de custo de coletores concentradores por unidade de área	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 DESCRIÇÃO CONCEITUAL DOS COLETORES SOLARES CONCENTRADORES.....	5
2.1 CONFIGURAÇÕES DOS COLETORES CONCENTRADORES	5
2.2 COMPARAÇÕES ENTRE AS CONCENTRAÇÕES	6
2.2.1 A segunda lei da termodinâmica aplicada à concentradores solares	8
2.2.2 Concentradores ideais de duas e três dimensões	9
2.3 DESEMPENHO TÉRMICO.....	13
2.4 DESEMPENHO ÓPTICO	16
2.5 ABSORVEDORES CILÍNDICOS	17
2.6 COLETORES NÃO FORMADORES DE IMAGEM	19
2.6.1 Concentradores de segundo estágio.....	26
2.7 COLETORES FORMADORES DE IMAGEM.....	29
2.7.1 Imagem Linear.....	29
2.7.2 Imagem Pontual.....	37
3 COLETORES SOLARES CONCENTRADORES COMERCIAIS	41
3.1 Coletores Solares Concentradores fabricados por PARASOL.....	41
3.2 Coletores Solares Concentradores fabricados por SOLITERM	42
3.3 Coletores Solares Concentradores fabricados por FASOL.....	44
3.4 Coletores Solares Concentradores fabricados por Heinrich	45
3.5 Coletores Solares Concentradores fabricados por SOLARMUNDO	45
4 POTENCIAL DE ENERGIA SOLAR EM UM PONTO DO BRASIL.....	47
4.1 Atlas Solarimétrico	47
4.2 Local Escolhido	49
4.3 Avaliação do potencial.....	50
4.4 Avaliação da Radiação direta.....	50
4.5 Energia gerada por um coletor concentrador e sua quantidade de vapor	52
4.5.1 Coletores Solares Concentradores fabricados por PARASOL	53
4.5.2 Coletores Solares Concentradores fabricados por SOLITEM.....	54
5 CONCLUSÃO.....	55
6 BIBLIOGRAFIA.....	56

1 INTRODUÇÃO

A humanidade da era atual é movida por elevado consumo de energia. A forma deste consumo varia entre diversas formas de energia, podendo ser mecânica, elétrica, térmica, entre outras, e grande parte da necessidade de energia é na forma térmica. Porém, muito se utiliza de conversão de energia elétrica em energia térmica. E grande parte desta energia elétrica, é precedida de energia térmica.

Além disso, grande parte das companhias geradoras de energia elétrica utiliza energia de outras formas até que esta esteja na forma elétrica, que é disponível ao consumidor final. No entanto, para cada etapa há uma eficiência na conversão da forma de energia, ou seja, há perdas. Com a disponibilidade da energia na forma de eletricidade para o consumidor, grande parte deste converte-a novamente para energia térmica, gerando uma nova etapa em que há perdas.

O uso da conversão de radiação solar em energia térmica para suprir a demanda térmica, permite um melhor aproveitamento por ter menos perdas considerando o caminho da fonte primária até a forma final da energia, pois há uma menor quantidade de conversões da energia, além de ter um melhor custo-benefício em grande parte do globo terrestre. Dessa forma, o custo efetivo poderá ser três vezes menor, mesmo em regiões de pouca intensidade de radiação solar. A utilização de energia térmica, para conversão direta da energia solar, através de concentradores solares, é mais barata que outras formas de conversão renováveis, e é competitiva com formas de conversão que utilizam combustíveis fósseis.

Vannoni **et al.** (2008) analisaram a demanda térmica industrial da Europa e verificaram que 30% dessa demanda é para temperaturas menores que 100°C. Que poderia ser suprida integralmente, ou em parte, por coletores solares tipo placas planas, que é amplamente encontrado no comércio. E há os coletores planos de tubo evacuado, que podem suprir demandas para até temperaturas de 120°C.

De acordo com Vannoni **et al.** (2008), 27% da demanda térmica da indústria europeia são para temperaturas entre 100 e 400°C. E essa faixa de temperaturas pode ser suprida por coletores solares concentradores, que foram descritos neste trabalho. O gráfico da Figura 1.1 expõe a proporção do consumo de energia por faixas de temperatura, abaixo de 100°C, entre 100 e 400°, e acima de 400°C, de nove setores

da indústria, sendo elas: mineração, alimentícia, fumo, papel e celulose, química, minerais não metálicos, metais básicos, maquinaria, transporte e outros.

Como mostra a Figura 1.1, conforme análise de Vannoni *et al.* (2008), 57% do consumo térmico do setor industrial é para baixas e médias temperaturas. Esta parcela pode ser atendida diretamente pela conversão da energia solar em térmica, por concentradores solares, que foi o objeto deste trabalho. Dessa forma, poderá haver menores perdas de energia na totalidade dos processos de conversão desta desde a fonte primária (Sol) até o consumo final (calor), que pode ser em processos industriais nos quais trabalham com aquecimento de fluido líquido, ou em processos que demandam de vapor.

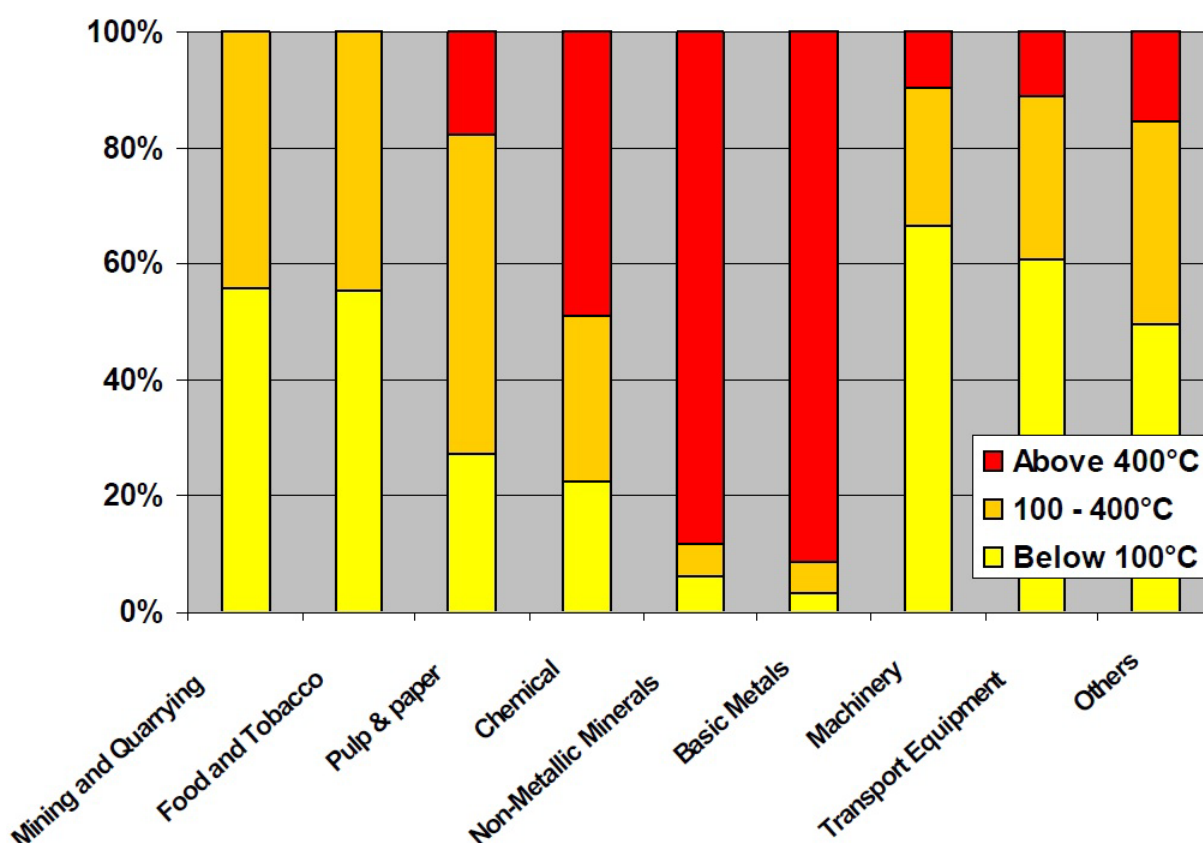


Figura 1.1 - Consumo de energia em faixa de temperatura de alguns setores industriais (VANNONI *et al.*, 2008).

A utilização de concentradores solares para geração de vapor é válida também para geração de energia elétrica, em centrais térmicas solares. A Tabela 1.1 mostra o custo aproximado, em Reais por Megawatt, de diferentes formas de centrais de geração de energia elétrica. Centrais térmicas solares teriam um custo aproximado de R\$ 100,00 por MWh gerado, sendo altamente competitivo com centrais hidroelétricas.

Esta última possui a desvantagem ambiental de alagar grandes áreas para conseguir suficiente energia potencial decorrente da pressão exercida pela água represada, e transformando essa energia em cinética, pelo movimento das turbinas. Enquanto que concentradores solares convertem a radiação solar em energia térmica diretamente no fluido que é enviado à turbina, sem a necessidade de ocupação de espaço além dos próprios equipamentos da central de geração de energia elétrica.

Tabela 1.1 Custo de geração de energia elétrica em algumas formas de conversão de energia.

Forma de conversão de energia	R\$ / MWh
Hidroelétrica	100
Gás	300
Óleo combustível	700
Óleo diesel	1000

Recentemente o Brasil vem mostrando um bom crescimento econômico, fato este que tem como consequência natural o aumento da demanda no consumo de energia térmica e elétrica. No verão e em parte da primavera, o Governo brasileiro estabelece o horário de verão em parte do país. Dessa forma há um aumento da faixa de tempo do consumo da hora de pico, diminuindo o consumo instantâneo máximo. Juntando estes últimos fatores, fica clara a necessidade da construção de mais centrais de geração elétrica.

O procedimento para a construção de termoelétricas necessita de menos tempo do que hidroelétricas. Visando o crescimento econômico, as termoelétricas têm vantagem para o suprimento desta crescente demanda. Estas, sendo alimentadas por combustíveis fósseis ou biomassa, liberam poluentes químicos e térmicos para a atmosfera. Observado os efeitos das centrais termoelétricas e hidroelétricas, bem como a disponibilidade de radiação solar no território brasileiro, fica clara a oportunidade que surge para centrais solares térmicas.

As centrais termossolares, para o uso de energia térmica podem utilizar diferentes tipos de coletores solares, variando com o tipo do projeto. Para projetos onde são necessárias temperaturas menores que 100°C , pode ser utilizadas placas planas ou concentradores solares. A vantagem dos coletores concentradores está na possibilidade de diminuir o absorvedor sem diminuir a área de coleta da radiação solar. O efeito disso é menos perdas, pois quanto maior for a área do absorvedor, maior são as perdas de energia. E para projetos acima de 100°C existem diferentes tipos de coletores

concentradores. Neste trabalho, os concentradores estão divididos em dois tipos: concentradores formadores de imagem e concentradores não formadores de imagem.

Entre os concentradores formadores de imagem há os formadores de imagem linear e os concentradores de três dimensões. A taxa de concentração pode variar entre valores entre zero e um, até a ordem de grandeza de 10^5 (GOSWAMI *et al.* , 1999). Esse valor é proporcional à temperatura fornecida pelo absorvedor. Com exceção aos concentradores de baixo fator de concentração, neste deve haver um sistema de orientação devido à variação do ângulo de incidência da radiação direta. A necessidade de manutenção de concentradores solares se dá principalmente a fim de manter a qualidade óptica em relação ao depósito de poeira, ações de intempéries, oxidação, atmosfera corrosiva, etc.

Neste trabalho estão descritas as principais concepções conceituais de coletores concentradores relatadas na literatura e também a descrição de alguns modelos já disponíveis comercialmente. Na parte conceitual do trabalho estão apresentadas as principais características que identificam e podem prever o desempenho dos coletores concentradores. Para tal seguiu-se a orientação dada por Rabl (1976), Duffie e Beckman (2006) e Scheffler (2010). Depois se fez um apanhado das informações dos modelos comerciais sob o ângulo conceitual mostrando eventuais lacunas de informação. Ao final um exemplo de potencial solar em uma região brasileira será discutido como aplicação de coletor solar concentrador para geração de vapor.

2 DESCRIÇÃO CONCEITUAL DOS COLETORES SOLARES CONCENTRADORES

De acordo com Duffie e Beckman (2006), os concentradores solares são divididos em dois grupos: não formadores de imagem e formadores de imagem. Os primeiros, não formam imagem definida no receptor, porém concentram toda a radiação solar em todas as partes do receptor. Nestes, a taxa de concentração, geralmente, é abaixo de 10. Já os concentradores formadores de imagem, formam uma imagem definida no receptor. E neste capítulo foram discutidas as diferenças potenciais entre eles.

2.1 CONFIGURAÇÕES DOS COLETORES CONCENTRADORES

Os concentradores podem ser de diversos formatos e podem ser refletores ou refratores. Podem ser cilíndricos no foco em linha, ou circulares, no foco em ponto. Enquanto que os receptores podem ser côncavos ou convexos. A Figura 2.1 ilustra seis exemplos, de (a) a (f) de possíveis geometrias para refletores, porém, as possíveis geometrias para concentradores não se limitam ao que esta figura ilustra, ficando ao limite da imaginação dos realizadores do projeto.

O coletor da Figura 2.1 (a) utiliza absorvedores tubulares evacuados como refletor difuso, enquanto que a diferença entre este modelo e o coletor da Figura 2.1 (b) é que o refletor deste último é especular. O absorvedor da Figura 2.1 (c) é plano, e é unido a um refletor também plano em cada borda. A razão de concentração máxima deste último não alcança 4.

O coletor da Figura 2.1 (d) ilustra um perfil que pode pertencer a um concentrador parabólico cilíndrico ou circular, se este for revolucionado. Nesta última configuração, o absorvedor pode ser esférico ou hemisférico, enquanto que na primeira, o absorvedor pode ser plano ou tubular. As duas últimas configurações, Figura 2.1 (e) e (f) são do tipo Fresnel, nas quais são um conjunto de refletores planos que acompanham o movimento do Sol, em relação à Terra, e que na Figura 2.1 (e), o movimento é unificado, enquanto que na Figura 2.1 (f), é individualizado.

De acordo com Duffie e Beckman (2006), é considerável que se a razão de concentração for alta, quer dizer, se a área da imagem do foco for muito menor que a

área de abertura o refletor, a radiação difusa se torna desprezível, sendo somente aproveitada a radiação solar direta. E nestes concentradores é necessário acoplar um sistema de rastreamento solar.

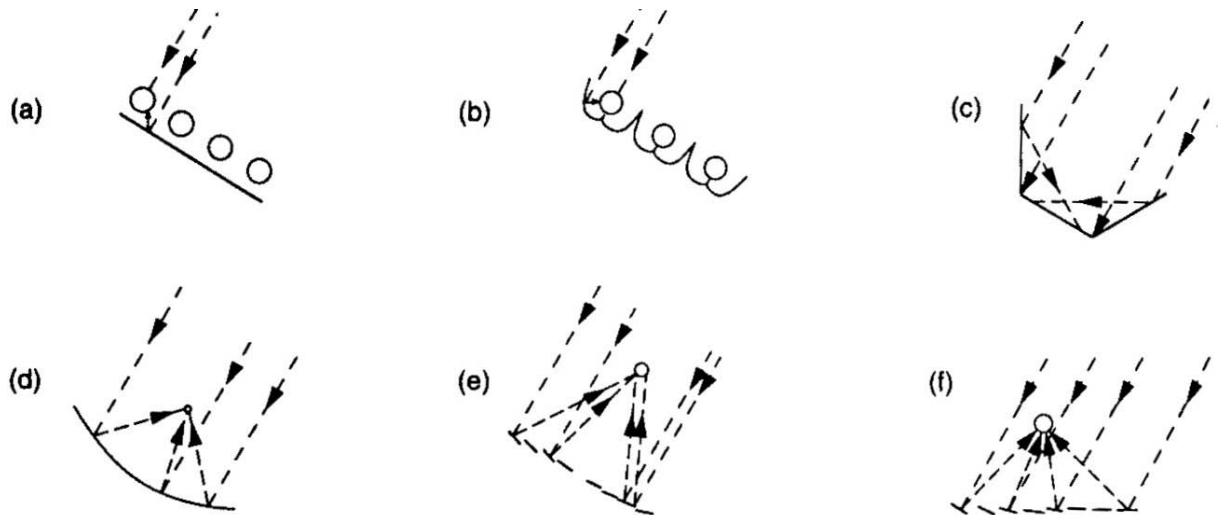


Figura 2.1 Perfis de concentradores: a) Absorvedor tubular com refletor difuso; b) absorvedor tubular com refletor especular; c) receptor plano com refletor plano; d) concentrador parabólico; e) refletor fresnel e; f) heliostatos com receptor central (DUFFIE e BECKMAN, 2006).

Os concentradores formadores de imagem linear podem ser movimentados pelo sistema acoplado de rastreamento solar por um eixo. Este eixo pode ser direcionado na posição norte-sul, leste-oeste, ou inclinados e paralelos ao eixo polar. Neste último caso, a velocidade angular transmitida pelo sistema de rastreamento é de $15^\circ/\text{hora}$. Já os concentradores formadores de imagem em ponto devem ser movimentados em dois eixos, um na vertical e outro na horizontal, ou um destes, paralelo ao eixo polar da Terra.

O sistema de rastreamento solar pode ser manual ou automático. Os sistemas manuais são aplicáveis aos concentradores de baixa razão de concentração, pois os concentradores cuja razão de concentração é média ou alta necessitam de precisão. Os concentradores de média e alta razão de concentração necessitam que os erros do sistema de rastreamento automático sejam conhecidos para o correto dimensionamento do receptor.

2.2 COMPARAÇÕES ENTRE AS CONCENTRAÇÕES

Rabl (1976) realizou um estudo comparativo entre os concentradores de perfis parabólicos, Fresnel, concentrador parabólico composto (CPC) e de calha em V,

avaliando-os pela razão de concentração. Para isso, além das diferenças entre as geometrias destes concentradores, o autor discutiu sobre ângulo de incidência, erros na reflexão e alinhamentos, dimensão da área do refletor e número médio dos reflexos.

Conforme Duffie e Beckman (2006) a razão de concentração pode ser definida tanto pela relação entre as áreas quanto pela razão entre o fluxo. E esta última consiste na razão entre o fluxo médio de energia em qualquer ponto do receptor com o fluxo na abertura do concentrador solar.

A razão de concentração é a relação entre a área de abertura do concentrador solar em relação ao Sol, e a área do absorvedor da radiação solar concentrada. Quanto menor for a área do absorvedor, menor é a perda de energia por radiação e convecção. Em contrapartida, quanto menor for o absorvedor, a temperatura do mesmo tende a ser maior, aumentando assim, a perda de energia tanto por radiação quanto por convecção. A Figura 2.2 esquematiza a geometria envolvida na transferência de energia por radiação entre o Sol e o absorvedor.

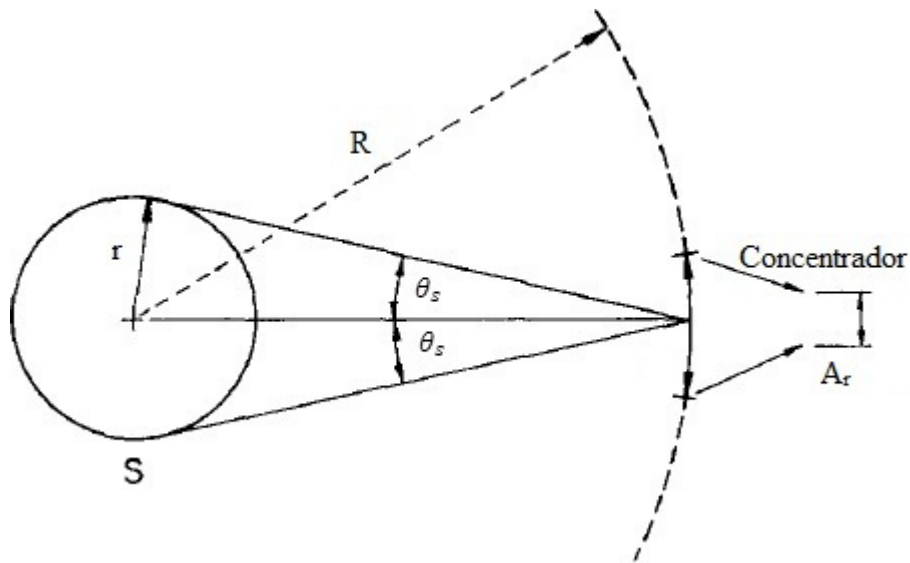


Figura 2.2 - Transferência de radiação do Sol (S) através da abertura (A) do cocentrador solar para o Absorvedor (A_{abs}) (RABL, 1976).

Conforme a ilustração da Figura 2.2, a radiação emitida pela fonte emissora (S) de raio (r), alcança o absorvedor (A_r) através do concentrador, com (R) de distância da fonte, e área de abertura (A_a). A radiação incidente no absorvedor é emitida a partir de todo o disco solar com a variação angular da normal ao concentrador ao meio ângulo θ_s . Pode ser considerado o limite $A_a/R \rightarrow 0$ para $\sin \theta_s = r/R$.

A razão de concentração é definido pela seguinte equação.

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (1)$$

No qual o elemento C é a razão de concentração, o A_a é a área de abertura do concentrador solar em relação ao Sol, e o A_r é a área do absorvedor ou receptor.

Rabl (1976) sugeriu definições para a razão de concentração ideal para concentradores de duas dimensões e de três dimensões, em relação ao ângulo de entrada (θ_s) na área de abertura do concentrador. Tal definição partiu de um enunciado no qual se desejou conhecer como a radiação, na qual é uniformemente distribuída com variação angular $|\theta| \leq |\theta_s|$ e incidente na área de abertura do concentrador solar, atingia o absorvedor, e o quão máximo poderia ser a concentração.

2.2.1 A SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA APLICADA ÀS CONCENTRADORES SOLARES

Partindo do enunciado da segunda lei da termodinâmica, e se dois corpos estão em igualdade de temperatura não há transferência de calor, pode ser considerado que se o Sol e o absorvedor forem dois corpos negros com temperaturas T_s e T_{abs} , respectivamente, e isolados no espaço a 0 K, o Sol emite.

$$Q_s = 4\pi r^2 \sigma T_s^4 \quad (2)$$

no fator de forma

$$F_{s \rightarrow A} = \frac{A_a}{4\pi R^2} \quad (3)$$

E desconsiderando as perdas, o calor irradiado do Sol para o absorvedor segue a seguinte expressão:

$$Q_{s \rightarrow abs} = Q_s \times F_{s \rightarrow A} = A_a \frac{r^2}{R^2} \sigma T_s^4 \quad (4)$$

E o absorvedor emitirá

$$Q_{abs} = A_r \sigma T_s^4 \quad (5)$$

O fator de forma do absorvedor para a fonte de radiação respeita a relação $F_{abs \rightarrow s} \leq 1$, portanto, o absorvedor emitirá

$$Q_{abs \rightarrow s} = F_{abs \rightarrow s} A_r \sigma T_{abs}^4 \quad (6)$$

Como não há transferência de calor quando há igualdade de temperaturas, ou seja, $T_s = T_{abs}$, pode ser considerado que

$$Q_{s \rightarrow abs} - Q_{abs \rightarrow s} = 0 \quad (7)$$

Combinando as equações (4), (6) e (7), obtêm-se a seguinte relação:

$$\frac{A_a}{A_r} = \frac{R^2}{r^2} F_{abs \rightarrow s} \quad (8)$$

Além de substituir a equação (1), a definição $\sin \theta_s = r/R$ comentada anteriormente, e considerando o fator de forma do absorvedor para o Sol, $F_{abs \rightarrow s} \leq 1$, na eq (8), deve ser considerado um índice de refração n para situações nas quais se deseja eliminar perdas por convecção. Para esta última finalidade, pode ser colocada uma parede transparente e paralela ao absorvedor, havendo vácuo entre eles, resultando na expressão abaixo, na qual Rabl (1976) sugeriu ser a máxima razão de concentração para concentradores em três dimensões.

$$C_{3dim,ideal} \leq \frac{n^2}{\sin^2 \theta_s} \quad (9)$$

Para concentradores bidimensionais, tais como calha parabólica, CPC, e outros, a equação da razão máxima de concentração.

$$C_{2dim,ideal} \leq \frac{n}{\sin \theta_s} \quad (10)$$

Conforme Duffie e Beckman (2006), o diâmetro da Terra é de $1,39 \times 10^9$ m e a distância R é uma distância média entre o Sol e a Terra de $1,495 \times 10^{11}$ ($\pm 1,7\%$) m. Assim sendo, com o meio ângulo $\theta_s \cong 0,27$, a concentração máxima média (devido ao valor de R) para concentradores de duas dimensões é de $C_{2dim,ideal} = 215$ e $C_{3dim,ideal} = 46.271$.

Rabl (1976) nomeou o concentrador que atingisse o limite de concentração ideal ($1/\sin \theta_c$) de concentrador ideal. E foi demonstrado pelo autor que o modelo de concentrador solar CPC atinge esse ideal se forem consideradas somente as propriedades óticas sem quaisquer perdas. Um concentrador é ideal se, e somente se, o fator de forma $F_{abs \rightarrow s|ideal} = 1$ (o subscrito abs significa absorvedor, e o S, representa o sol). Quer dizer, se toda a radiação emitida pelo absorvedor atingir o Sol, o primeiro pode ser considerado um concentrador ideal com as restrições mencionadas.

2.2.2 CONCENTRADORES IDEAIS DE DUAS E TRÊS DIMENSÕES

O concentrador parabólico de duas dimensões, ou calha parabólica, está ilustrado na Figura 2.3. Este modelo de concentrador parabólico é simétrico ao eixo y , que é coincidente com o vértice da parábola e o centro do absorvedor. O ângulo δ é meio ângulo de entrada da radiação. Este ângulo compõe a soma do raio angular do Sol, $\delta_s = 4,7$ mrad, com o ângulo gerado pelas imperfeições superficiais do espelho e do direcionamento do mesmo, $\delta_m = 2\langle n \rangle \Delta$, sendo que n é o número de reflexões dos raios solares, e Δ ...

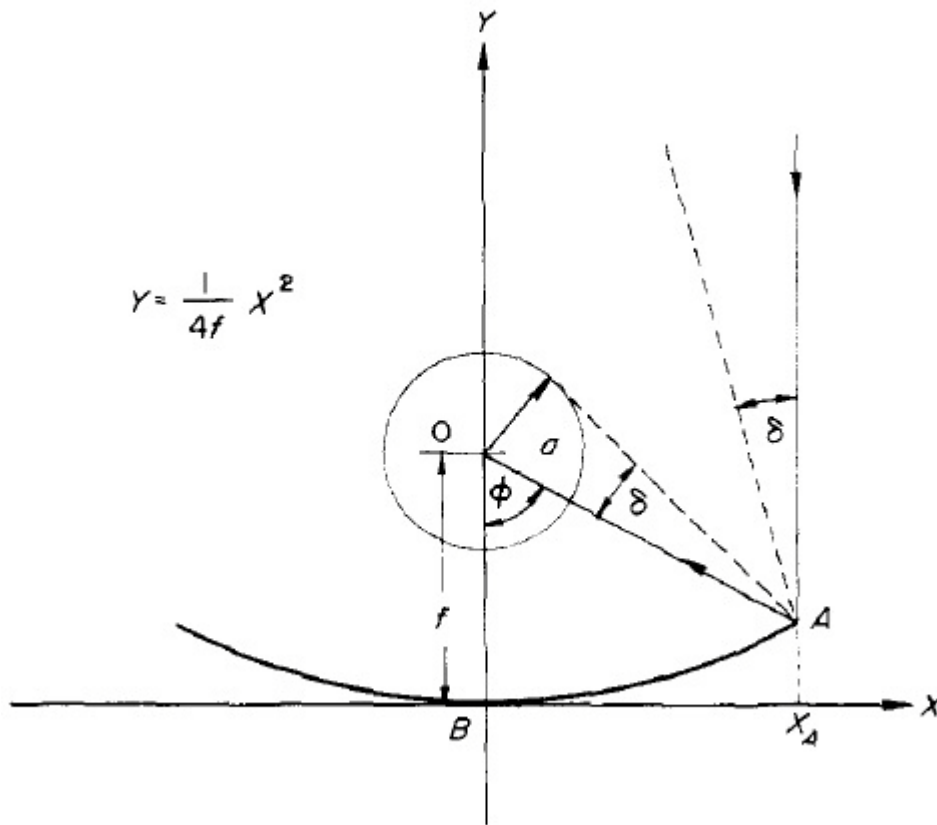


Figura 2.3 - perfil de concentrador parabólico e a área focal (RABL, 1976).

O ângulo de borda $\phi = \angle OAB$, ilustrado na Figura 2.3, determina a abertura do concentrador. Se o raio a do absorvedor for o menor possível, excluindo qualquer perda de radiação, a taxa de concentração máxima para o concentrador de duas dimensões, com o absorvedor cilíndrico, se torna:

$$C_{2 \text{ dim parab. cil. abs}} = \frac{\sin \phi}{\pi} C_{ideal \ 2 \text{ dim}} \quad (11)$$

E a taxa de concentração máxima para o concentrador parabólico em três dimensões e com o absorvedor esférico é

$$C_{3 \text{ dim parab. esf. abs}} = \frac{\sin^2 \phi}{4} C_{ideal \ 3 \text{ dim}} \quad (12)$$

De acordo com Rabl (1976), as duas equações citadas acima, são para concentradores parabólicos com o absorvedor com o perfil circular. Este tipo de absorvedor possui o maior fator de concentração quando o ângulo de borda $\phi = \pi/2$, e se possível manter a concentração em um fator $1/\pi$ ou $1/4$ menor que o limite ideal. Porém, há absorvedores planos, mas que podem ser considerados também como cavidades. A concentração neste tipo de absorvedor é maior.

Os absorvedores planos podem concentrar radiação em um lado ou em ambos. O absorvedor que recebe a radiação solar em um dor lados causa uma sombra no refletor do concentrador. Já o receptor plano que recebe a radiação solar em ambos os lados, também causa sombra, porém a radiação proveniente desta sombra é absorvida no lado oposto do mesmo, mas a sua área é o dobro do primeiro tipo. E a concentração entre estes dois tipos de absorvedores planos são relacionados de acordo com a equação abaixo.

$$C_{1\text{ lado}} = C_{2\text{ lados}} - 1 \quad (13)$$

De acordo com os estudos de Rabl (1976), o concentrador de absorvedor plano possui a máxima concentração na abertura de borda em:

$$\phi_{\text{máx}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right) \quad (14)$$

Para um ângulo de borda da equação (14), a razão de concentração para concentradores parabólicos com absorvedores planos que concentram em um lado, de acordo com Rabl (1976) é dada pela equação seguinte.

$$C_{2\text{ dim parab.,abs.plano 1 lado}} = \frac{1}{2} C_{2\text{ dim ideal}} - \frac{3}{2} \quad (15)$$

E para o concentrador de três dimensões, segundo Rabl (1976) a razão de concentração resulta em:

$$C_{3\text{ dim parab.,abs.plano 1 lado}} = \frac{1}{4} C_{3\text{ dim ideal}} - \frac{1}{2 \sin \delta} - \frac{3}{4} \quad (16)$$

E para concentradores com absorvedores planos que concentram a radiação solar em ambos os lados, é realizado uma interação entre as equações (13) e (15) ou (16).

O modelo de concentrador do tipo Fresnel com torre central é formado com vários espelhos (heliostatos) distribuídos em um campo. A geometria do refletor é formada a partir de segmento de parábola e cada um dos heliostatos possui movimentos

individuais mantendo a radiação solar, refletida pelo mesmo, direcionada no foco de uma torre central.

Os tipos de perdas que podem ocorrer devido às características do modelo de concentrador solar Fresnel são por sombreamento e bloqueio. A perda por sombreamento ocorre quando um heliostato causa sombra em outro. E as perdas por bloqueio ocorrem quando a reflexão de um espelho intercepta o outro ao invés de ir ao foco da torre central.

Este tipo de concentrador pode ser tanto bidimensional como tridimensional. E de acordo com os estudos de Rabl (1976), a concentração máxima que o modelo de duas dimensões com o absorvedor cilíndrico pode atingir obedece à seguinte equação:

$$C_{2\text{ dim Fresnel.abs cilíndrico}} = \psi \frac{\sin \phi}{\pi} C_{ideal\ 2\text{ dim}} \quad (17)$$

A variável ψ indica a fração do terreno que é coberta por espelhos. A razão de concentração de concentradores do tipo Fresnel de três dimensões, com o absorvedor esférico, é dada pela equação abaixo (Rabl, 1976).

$$C_{3\text{ dim Fresnel.abs esférico}} = \psi \frac{\sin^2 \phi}{4} C_{ideal\ 3\text{ dim}} \quad (18)$$

Para concentradores deste mesmo modelo, mas com o absorvedor em placa, a máxima concentração para configuração bidimensional dos concentradores Fresnel é

$$C_{2\text{ dim Fresnel.placa}} = \psi \cos(\phi + \delta) \sin \phi C_{ideal\ 2\text{ dim}} \quad (19)$$

E para concentradores configurados em três dimensões a equação é

$$C_{3\text{ dim Fresnel.placa}} = \psi [\cos(\phi + \delta) \sin \phi]^2 C_{ideal\ 3\text{ dim}} \quad (20)$$

Independente do espaçamento entre os espelhos, e por consequência também da variável ψ , de acordo com Rabl (1976), a máxima concentração para o concentrador com absorvedor em chapa, é obtida com o ângulo de borda $\phi_{m\acute{a}x} = \pi/4$. E para concentradores com o absorvedor esférico uma máxima concentração não é obtida, mas na prática adota-se $\phi_{m\acute{a}x} = 60^\circ$.

Outro modelo estudado por Rabl (1976) foi o concentrador de calha com perfil em V. Este modelo é definido pelo ângulo de borda ϕ e pela concentração:

$$C = \frac{A}{A_{abs}} \quad (21)$$

A Figura 2.4 mostra uma relação entre a taxa de concentração e a temperatura no receptor. A linha nomeada de *lower limit* (limite mais baixo) representa a taxa de concentração em que o limite em que as perdas térmicas são equivalentes à energia absorvida. A área sombreada corresponde à eficiência de 40% a 60%. A figura ilustra também a variação de concentradores cilíndricos, cônicos e parabólicos.

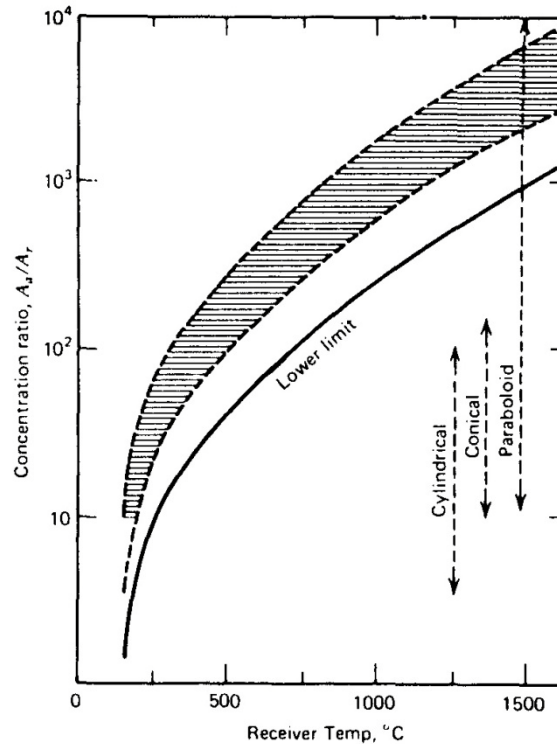


Figura 2.4 - Relação entre taxa de concentração e temperatura no receptor (DUFFIE e BECKMAN, 2006).

2.3 DESEMPENHO TÉRMICO

A dificuldade de se estabelecer um padrão para o cálculo do desempenho de coletores está na variedade da geometria do receptor. Geralmente, as perdas do receptor ocorrem desta seção do coletor solar para três direções, que são para o ambiente, por radiação e por convecção, para o suporte da estrutura e pela parte do isolamento térmico que não está sob a incidência de radiação solar. E isso é analisado pelo cálculo do coeficiente de perdas térmicas, U_L .

$$U_L = \frac{Q_{Loss}}{A_{abs}(T_{abs} - T_a)} \quad (26)$$

Onde T_{abs} e T_a são as temperaturas da superfície externa do absorvedor e do ambiente, respectivamente. A variável Q_{Loss} é a energia perdida do receptor para o ambiente. Considerando um coletor linear de comprimento L , cujo receptor é cilíndrico, composto por um tubo absorvedor e uma cobertura de vidro, o calor transferido do absorvedor à temperatura T_{abs} , Para a superfície interna do vidro à temperatura T_{ci} , através do mesmo até a superfície externa à temperatura T_{co} , para o ambiente e para o céu, às temperaturas T_a e T_{sky} , respectivamente, é dado por:

$$Q_{Loss} = \frac{2\pi k_{eff}L}{\ln(D_{ci}/D_{abs})} (T_{abs} - T_{ci}) + \frac{\pi D_{abs} L \sigma (T_{abs}^4 - T_{ci}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{abs}} + \frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} \left(\frac{D_{abs}}{D_{ci}} \right)} \quad (27)$$

$$Q_{Loss} = \frac{2\pi k_c L (T_{ci} - T_{co})}{\ln(D_{co}/D_{ci})} \quad (28)$$

$$Q_{Loss} = \pi D_{co} L h_w (T_{co} - T_a) + \varepsilon_c \pi D_{co} L \sigma (T_{co}^4 - T_{sky}^4) \quad (29)$$

Onde o subscrito *abs* é referente ao absorvedor, *ci*, à superfície interna da cobertura de vidro, e *co*, a superfície externa da mesma. A variável D é o diâmetro e ε é a emissividade do material, h_w é o coeficiente de transferência térmica por convecção entre a superfície externa do vidro e o ar ambiente e σ é a constante de Stefan-Boltzman, com o valor de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$.

A variável k_c é o coeficiente de condução térmica da cobertura (de vidro, por exemplo) e k_{eff} é o coeficiente efetivo de condutibilidade térmica entre o absorvedor e o vidro, que, se houver vácuo, ou baixar pressões, o valor é igual a zero. E se houver perdas através do suporte do absorvedor, considera-se a seguinte equação:

$$Q_{Sup} = (UA)_{sup} \Delta T \quad (30)$$

O procedimento de cálculo se inicia assumindo um valor para T_{co} um pouco acima da temperatura ambiente, e então, utilizando a equação (29), encontra-se um valor para Q_{Loss} e o valor de T_{ci} pela equação (28). Substituindo o então encontrado valor de T_{ci} na equação (27), encontra-se outro valor para Q_{Loss} , que se não for igual ao encontrado anteriormente, deve ser assumido outro valor para T_{co} . Na situação de o valor de Q_{Loss} continuar sendo diferente, de acordo com Duffie e Beckman (2006), pode ser feito uma interpolação linear para encontrar o valor de T_{co} , e então obter o valor de Q_{Loss} .

Devido ao gradiente de temperatura como fluxo do fluido térmico, o cálculo de U_L é feito dividindo-se o coletor em várias seções. A Figura 2.5 mostra a variação do coeficiente de perdas térmicas com o gradiente de temperatura ao longo de um receptor.

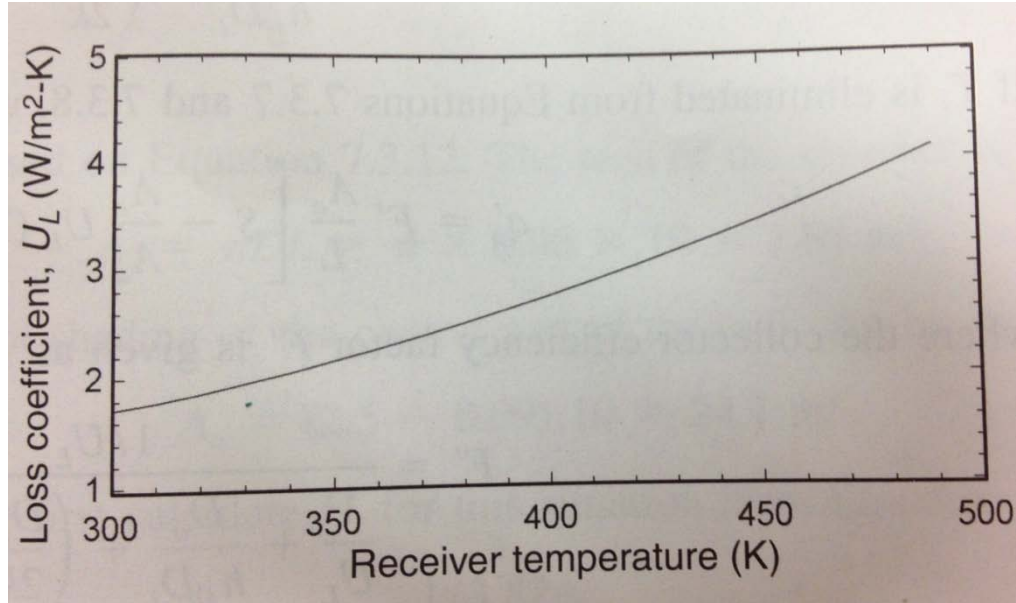


Figura 2.5 Variação do coeficiente de perdas térmicas com o gradiente de temperatura do receptor (DUFFIE e BECKMAN, 2006).

O fator de troca de calor global, U_o , considera a transferência de calor entre a superfície externa do tubo absorvedor e o fluido térmico, que é dado pela seguinte equação:

$$U_o = \left(\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi}D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k} \right)^{-1} \quad (31)$$

Onde D_i e D_o é o diâmetro interno e diâmetro externo, respectivamente, e k é o coeficiente de condutibilidade térmica deste tubo, e h_{fi} é o coeficiente de transferência de calor do tubo para o fluido térmico. A seguinte expressão revela o ganho de energia por unidade de comprimento do coletor, que é dado por:

$$q'_u = \frac{A_a S}{L} - \frac{A_{abs} U_L}{L} (T_{abs} - T_a) \quad (32)$$

Em que S é a radiação solar absorvida, daquela que atinge o concentrador, por unidade de área de abertura do concentrador solar, e F' é o fator de eficiência do coletor solar, que é dado por:

$$F' = \frac{U_o}{U_L} \quad (33)$$

E para o cálculo da energia térmica útil fornecida pelo coletor solar, também é necessário que o fator de fluxo, F'' , seja calculado pela equação:

$$F'' = \frac{\dot{m} C_p}{A_{abs} U_L F'} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_{abs} U_L F'}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (34)$$

Para a obtenção do fator de remoção de calor do coletor, F_R , pela equação abaixo.

$$F_R = F' \times F'' \quad (35)$$

E então se obtém a energia útil do coletor pela seguinte equação

$$Q_u = F_R A_a \left[S - \frac{A_{abs}}{A_a} U_L (T_i - T_a) \right] \quad (36)$$

em que T_i , é a temperatura média do fluido. Se, no receptor, não houver cobertura no absorvedor, há mudanças de cálculo de U_L , em que se considera perda por convecção entre o absorvedor e o ambiente, o cálculo de Q_{loss} se torna mais simples, no formato de $Q_{loss} = Q_{radiação} + Q_{convecção}$, e no cálculo de S .

2.4 DESEMPENHO ÓPTICO

Mesmo com a variedade existente na geometria dos coletores solares, há uma equação conceitual que se aplica a todos os concentradores para a avaliação de desempenho óptico. A variável S , como visto anteriormente, na seção 2.3, é a quantidade de energia que o coletor absorve por unidade de área de abertura, e isso envolve as propriedades ópticas do refletor do concentrador, da cobertura do receptor e do absorvedor. A seguinte equação relaciona estas propriedades.

$$S = I_b \rho (\gamma \tau \alpha)_n K_{\gamma \tau \alpha} \quad (37)$$

A variável I_b é a incidência de radiação solar direta na área de abertura do concentrador solar, porém, para concentradores de baixa razão de concentração, a radiação difusa também é considerada, mas será refletida também de forma difusa, então apenas uma parcela desta atingirá o absorvedor.

O fator ρ é a refletância do espelho do concentrador, o fator τ é a transmitância da cobertura do absorvedor, e o fator α é a absortividade do absorvedor, quer dizer, é a fração da radiação refletida pelo espelho do refletor e transmitida pelo material da cobertura do receptor que é absorvida no absorvedor. O fator de interceptação γ é a fração da radiação refletida pelo concentrador que atinge o absorvedor. Os fatores γ , τ e α variam em função do ângulo de incidência da radiação solar no plano de abertura do

concentrador solar. A Figura 2.6 ilustra um exemplo de distribuição do fluxo de radiação em um receptor de largura de A a B.

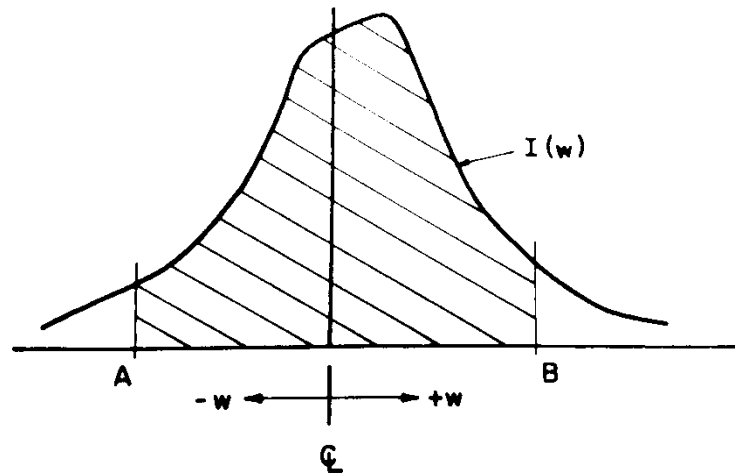


Figura 2.6 Exemplo de distribuição do fluxo de radiação no receptor plano de um concentrador formador de imagem linear (DUFFIE e BECKMAN, 2006).

Portanto, o fator de interceptação γ se define por:

$$\gamma = \frac{\int_A^B I(w) dw}{\int_{-\infty}^{+\infty} I(w) dw} \quad (38)$$

Normalmente, o fator de interceptação é maior que 0,9.

O fator $K_{\gamma\tau\alpha}$ é o ângulo de incidência modificado, que quantifica os desvios da radiação incidente na abertura do concentrador. Este fator deve ser analisado individualmente em cada eixo de simetria do concentrador solar, em coletores cilíndricos, por exemplo, são dois eixos de simetria.

2.5 ABSORVEDORES CILÍNDICOS

Nos concentradores formadores de imagem linear normalmente são utilizados receptores de tubos, como mostrado na Figura 2.7. Neste receptor, o fluido de trabalho circula no interior de um tubo absorvedor envolvido por um invólucro transparente. Os vetores mostrados na Figura 2.7 indicam o fluxo de energia em que os subíndices G indicam o que ocorre no invólucro, e o subíndice A, no absorvedor.

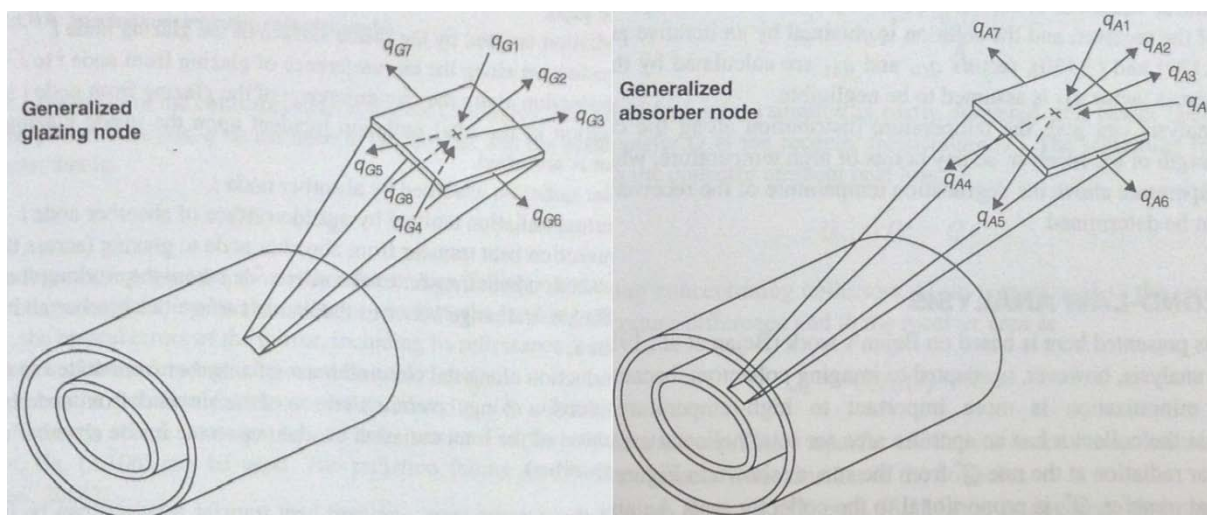


Figura 2.7 Esquema ilustrativo do fluxo de calor em absorvedores tubulares generalizados (KARIMI *et al.*, 1986 apud KALOGIROU, 2009).

O subíndice numeral 1 indica a radiação solar incidente. O subíndice numeral 2 indica a troca de calor com a vizinhança. Os subíndices 3 e 4 são trocas por convecção. O subíndice 5 é a radiação emitida. Os subíndices 6 e 7 indicam a condução de calor. E o subíndice 8 indica a fração da radiação solar que é absorvida pela superfície.

A Figura 2.8 (a) e (b) ilustram dois absorvedores tubulares do tipo Dewar. Em ambos os modelos, o receptor possui dois cilindros de vidro concêntricos e evacuados entre estes. No tubo do tipo Dewar da Figura 2.8 (a), um absorvedor seletivo envolve o exterior do tubo interno do receptor. Há um tubo no interior ao tubo interno pelo qual ocorre a entrada do fluido de trabalho e a troca de calor entre este e o absorvedor seletivo.

No interior do vidro interno do tubo tipo Dewar da Figura 2.8 (b), existe uma aleta absorvedora com perfil circular, pela qual ocorre a troca de calor com um tubo com dois passes, onde passa o fluido de trabalho, em que no primeiro passe, há contato deste com a aleta absorvedora, conforme destaque da Figura 2.8.

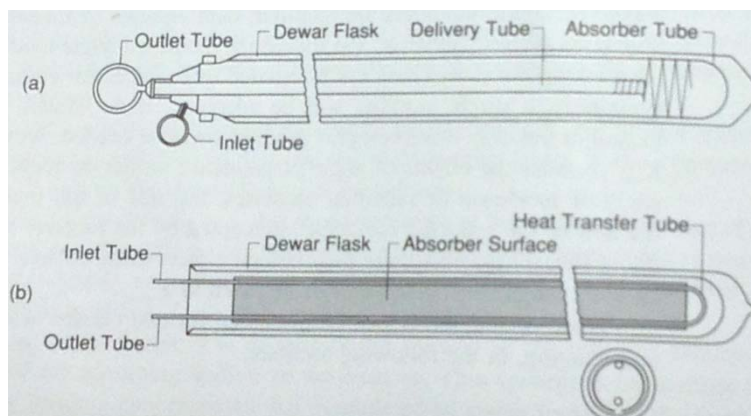


Figura 2.8 Dois tipos de tubo evacuado de Dewar com absorvedores cilíndricos: (a) com tubo interno, e (b) com aleta absorvedora (THEUNISSEN e BECKMAN, 1985 apud DUFFIE e BECKMAN, 2006).

O coletor da Figura 2.8 está mais bem detalhado pela Figura 2.9, em que uma matriz de absorvedores cilíndricos, espaçados por uma distância igual a um diâmetro, e um refletor plano e difuso localizado na parte de trás. Parte da radiação solar atinge os tubos, enquanto que a outra parte atinge o refletor difuso, que reflete a radiação de forma difusa.

Então parte desta radiação refletida atinge o receptor, e o restante é perdido para o céu. Conforme Theunissen e Beckman (1985) apud Duffie e Beckman (2006), a refletância deste espelho difuso é igual a 0.8. E conforme Chow et al.. (1984) apud Duffie e Beckman (2006), o valor de $F_R(\gamma\tau\alpha)_n$ varia entre 0,65 e 0,70.

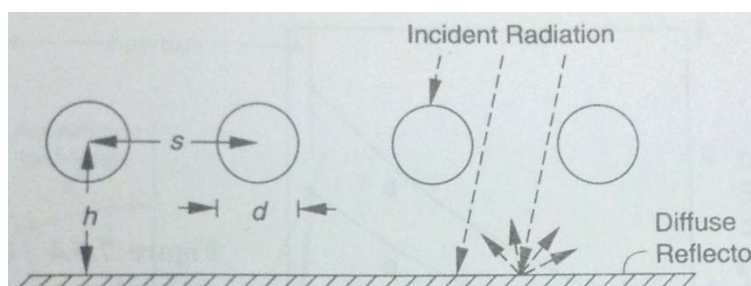


Figura 2.9 Coletor com matriz de receptores cilíndricos e refletor difuso atrás (DUFFIE e BECKMAN, 2006).

2.6 COLETORES NÃO FORMADORES DE IMAGEM

Os concentradores não formadores de imagem refletem toda a radiação incidente, que estejam dentro da abertura do ângulo de admissão, para o receptor durante todo o ano, sem a necessidade de grandes ajustes no posicionamento.

O CPC (Concentrador Parabólico Composto) é um concentrador solar não formador de imagem que foi bastante detalhado por Rabl (1976), Duffie (2006) e Kalogirou (2009). Pode ser de duas dimensões (tipo calha) ou três dimensões, e simétrico ou assimétrico. O receptor pode ser tubular ou aletado (com tubos). A Figura 2.10 mostra que o receptor aletado pode ser uma placa, bifacial ou uma cunha. Esta figura também mostra um absorvedor de tubo.

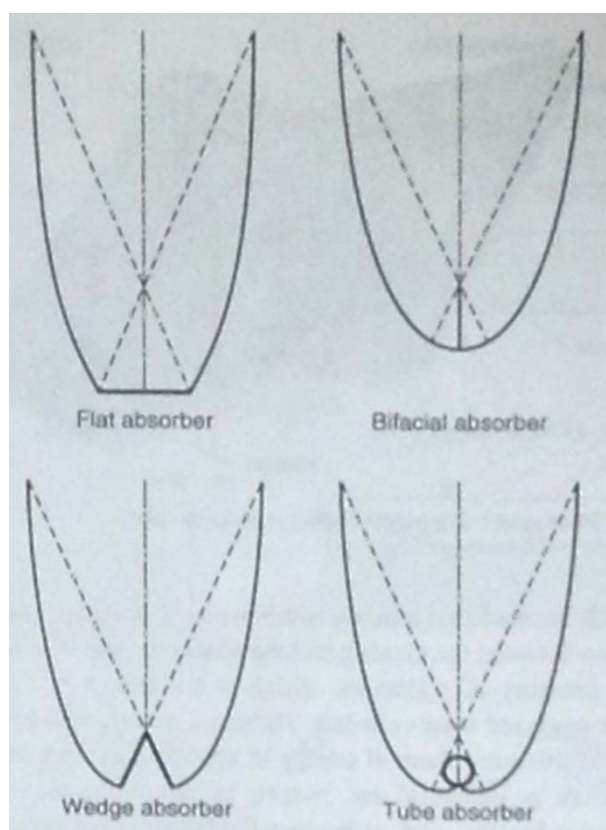


Figura 2.10 Tipos de absorvedores do CPC (KALOGIROU, 2009).

Cada lado do concentrador CPC é uma parábola, e o foco de cada parábola coincide com o final da parábola da parede oposta, como mostra a Figura 2.11. O perfil de cada parábola se estende até onde esteja paralelo com o eixo central do concentrador. Caso contrário, as linhas que formam o perfil do concentrador continuariam sem interrupções até que se encontrasse em um ponto coincidente com o plano central. A linha que coincide com a extremidade inferior de uma parábola e com a extremidade superior da outra, forma um ângulo com o eixo central do concentrador, denominado de meio ângulo de admissão θ_c .

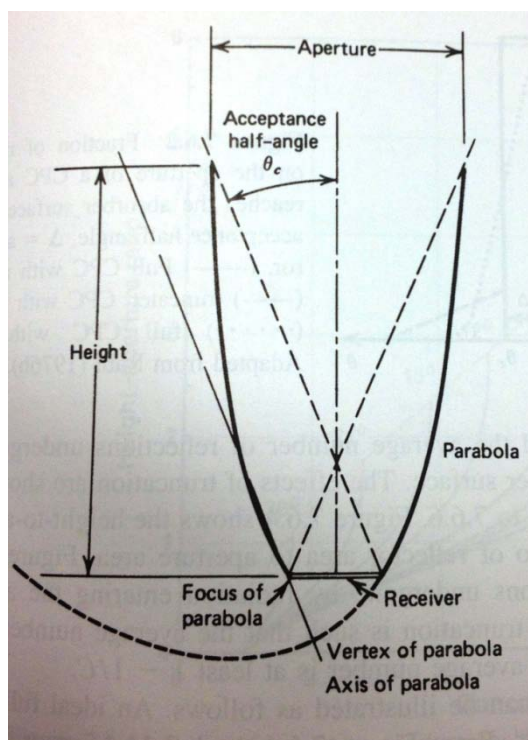


Figura 2.11 - Esquema do Concentrador Solar tipo CPC (DUFFIE e BECKMAN, 2006).

No vértice superior da parábola do CPC, as superfícies são paralelas com o plano central, e a região do refletor destas parábolas próximas a esse vértice refletem uma pequena parcela da radiação incidente na área de abertura de maneira que, se as parábolas forem truncadas a fim de diminuir a altura do perfil do CPC, a queda do desempenho do coletor seria muito pequena, mas não mudaria a razão altura-área de abertura do mesmo.

A Figura 2.12 ilustra um gráfico que foi gerado por Rabl (1976), utilizando *Ray Tracing* (programa computacional que simula o caminhamento de raios e as refrações ocorridas a partir de uma fonte), com a finalidade de analisar a fração da radiação incidente na abertura do CPC em um ângulo θ_c que atinge o receptor, assumindo a refletividade $\rho = 1$. O ângulo θ_c mostrado nesta figura também está presente na Figura 2.11.

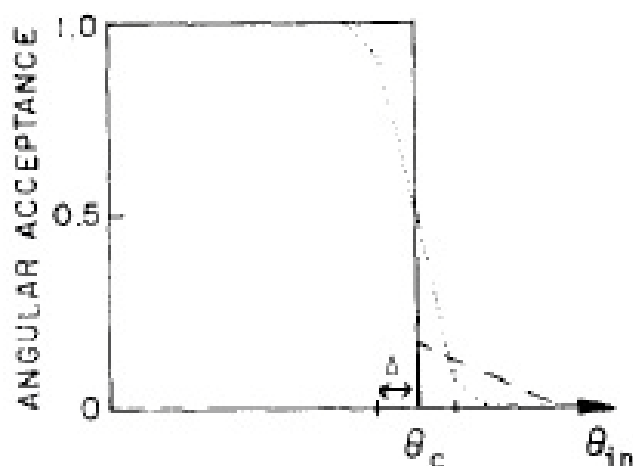


Figura 2.12 - Fração da radiação incidente na abertura do concentrador à θ_{in} que alcança o absorvedor, para concentradores ideais (RABL, 1976).

Todas as linhas vistas na Figura 2.12 representam o perfil CPC, porém com diferenças. A linha cheia representa a reflexão de um CPC ideal, e que não há erros na reflexão das parábolas. A linha tracejada representa um concentrador truncado e com reflexão ideal, e a linha pontilhada representa um concentrador com erros na superfície, em que Δ indica o erro angular desta superfície. E outra variação está ilustrada pela Figura 2.13, em que o CPC está construído com configuração de painel.

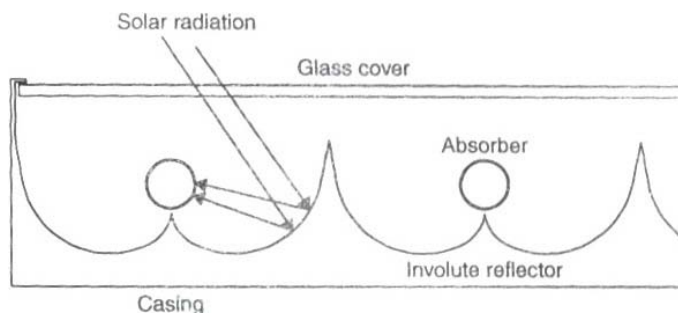


Figura 2.13 Esquema de painel de CPC (KALOGIROU, 2009).

A Figura 2.14 também mostra um CPC construído com configuração de painel, porém a cobertura é um tubo que envolve o absorvedor, enquanto que na Figura 2.13, a cobertura é plana e está sobre todo o painel, como uma tampa.

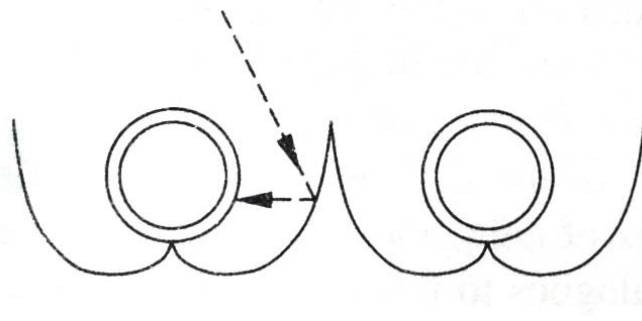


Figura 2.14 Esquema de painel de CPC (DUFFIE e BECKMAN, 2006).

De acordo com Kalogirou (2009) se o CPC for utilizado para altas temperaturas, pode ser acoplado um sistema de rastreamento de maneira intermitente. Conforme Duffie e Beckman (2006), a orientação do CPC deve seguir um eixo leste-oeste e uma inclinação em direção ao equador. Dessa forma, a radiação solar direta incidente dentro do intervalo do ângulo de admissão $\pm\theta_c$.

Segundo Duffie e Beckman (2006) é necessário determinar tanto o ângulo de incidência da radiação direta quanto a sua proporção na radiação global, bem como a proporção da radiação difusa e da radiação refletida por paredes do entorno. E a radiação absorvida S é determinada pela seguinte equação.

$$S = G_{b,CPC}\tau_{c,b}\tau_{CPC,b}\alpha_b + G_{d,CPC}\tau_{c,d}\tau_{CPC,d}\alpha_d + G_{g,CPC}\tau_{c,g}\tau_{CPC,g}\alpha_g \quad (39a)$$

$$G_{b,CPC} = F G_{bn} \cos \theta \quad (39b)$$

$$G_{d,CPC} = \begin{cases} \frac{G_d}{c} & \text{if } (\beta + \theta_c) < 90^\circ \\ \frac{G_d}{2} \left(\frac{1}{c} + \cos \beta \right) & \text{if } (\beta + \theta_c) > 90^\circ \end{cases} \quad (39c)$$

$$G_{g,CPC} = \begin{cases} \frac{G_d}{c} & \text{if } (\beta + \theta_c) < 90^\circ \\ \frac{G_d}{c} \left(\frac{1}{c} - \cos \beta \right) & \text{if } (\beta + \theta_c) > 90^\circ \end{cases} \quad (39d)$$

Em que G é a radiação incidente, e os subíndices b , d e g significam da radiação direta, da radiação difusa e da radiação refletida pelo entorno, respectivamente. O fator $\tau_{c,b}$ é a transmitância da cobertura em relação à radiação direta. O fator $\tau_{c,d}$ é a transmitância da cobertura em relação à radiação difusa. E $\tau_{c,g}$ é a

transmitância da cobertura em relação à radiação refletida pelas paredes do entorno. Os fatores α_b , α_d e α_g são referentes à absorção do absorvedor em relação à radiação direta, difusa e do reflexo das paredes do entorno, respectivamente.

Os ângulos ilustrados na Figura 2.15 consideram uma placa plana inclinada para o equador e o CPC orientado para leste-oeste. A variável β é a inclinação da placa e θ_c é o meio ângulo de admissão.

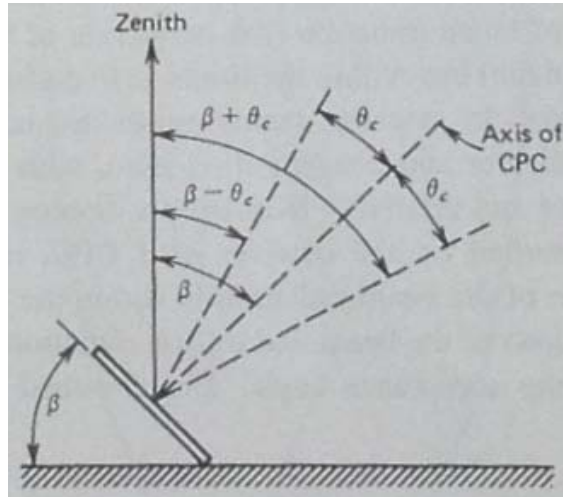


Figura 2.15 Representação esquemática dos ângulos de admissão da placa de CPC (DUFFIE e BECKMAN, 2006).

Para avaliação do desempenho e cálculo da energia útil do coletor CPC se utiliza a equação (36) e com o S calculado pela equação (39_a). A figura 2.16 apresenta uma estimativa do coeficiente global de perdas por unidade de área do absorvedor, mas tanto a temperatura de entrada quanto as condições climáticas devem ser conhecidas. A taxa de fluxo do fluido, F'' , é calculada pela equação (34).

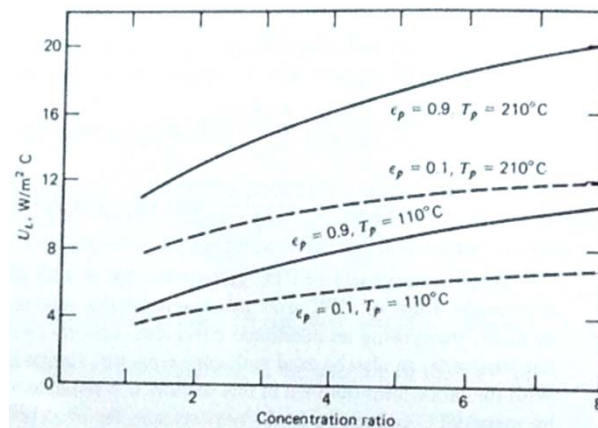


Figura 2.16 Estimativa do coeficiente global de perdas, U_L , para coletores CPC com placas absorvedoras (RABL, 1976b apud DUFFIR e BECKMAN, 2006).

A Figura 2.17 mostra o esquema geométrico do concentrador de calha com perfil em V. As letras τ_δ e τ_c indicam a incidência de radiação de entrada no concentrador,

sendo que a última, indica o ângulo máximo de incidência na qual a radiação atinge a abertura A_{abs} , e é tangencial à circunferência de referência. O ângulo θ_c expressa a inclinação de τ_c .

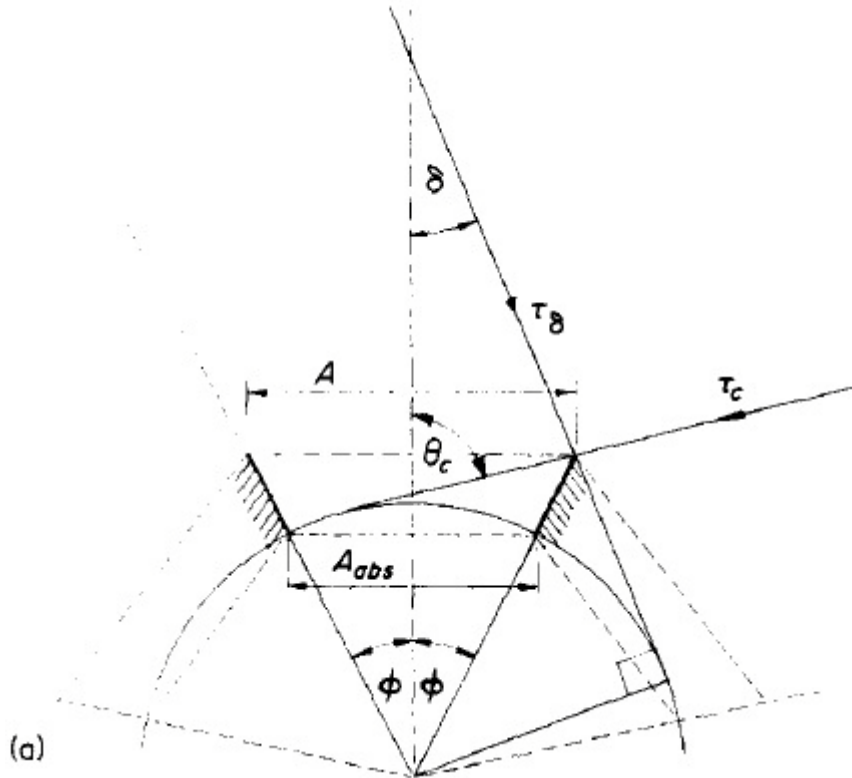


Figura 2.17 - Perfil do concentrador calha em V (RABL, 1976)

De acordo com Rabl (1976), a concentração para este caso é definida na seguinte equação:

$$C_v = \frac{1}{\sin(\delta + \phi)} \quad (22)$$

A equação seguinte refere-se à taxa de abertura do concentrador em relação à área do refletor.

$$R_t = \frac{1 - \sin(\delta + \phi)}{\sin \phi} \quad (23)$$

Rabl (1976) obteve o gráfico da Figura 2.18 utilizando a metodologia *Ray Tracing*. E com isso, foi possível realizar uma comparação entre o concentrador tipo CPC e o calha de perfil em V. Todos os raios $|\theta_{in}| < \delta$ atingem o absorvedor enquanto que os raios $|\theta_{in}| < \theta_c$ não o atingem. A região de transição possui 2ϕ é centralizada em $\delta + \phi = \sin^{-1}(1/C_v)$.

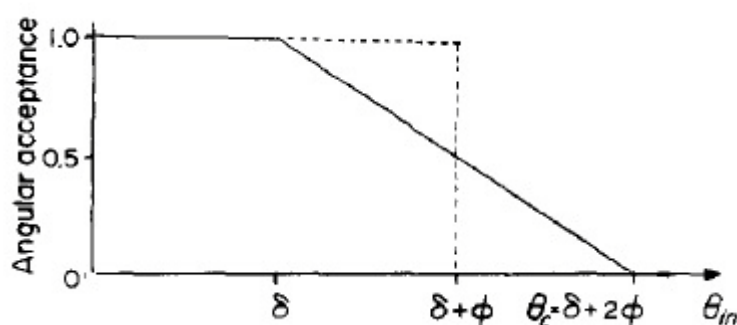


Figura 2.18 - Distribuição angular da incidência de radiação no concentrador calha em V (RABL, 1976)

O autor concluiu nessa comparação que a taxa de abertura e a perda de reflexão do modelo de concentrador calha com perfil em V são muito desfavoráveis na comparação com o modelo CPC quando a configuração possui um baixo ângulo de abertura ϕ . A Tabela 2.1 apresenta a diferença entre estes dois modelos com a variação do ângulo δ de $5,7^\circ$ e $19,5^\circ$.

Tabela 2.1 - Comparação entre o coletor concentrador modelo CPC e a calha com perfil em V (RABL, 1976).

$\delta = 5,7^\circ$ ($C_{ideal} = 10$)		$\delta = 19,5^\circ$ ($C_{ideal} = 3$)	
CPC	Calha em V ($\phi = 10^\circ$)	CPC	Calha em V ($\phi = 11^\circ$)
$C = 7,8$	$C = 3,7$	$C = 2,9$	$C = 2$
$R = 4,9$	$R = 4,1$	$R = 2,8$	$R = 2,5$
$\langle n \rangle = 1$	$\langle n \rangle = 1$	$\langle n \rangle = 0,75$	$\langle n \rangle = 0,75$

Na comparação entre os dois modelos (CPC e Calha em V), Rabl (1976) verificou que para um mesmo δ , foi obtido $\langle n \rangle$ iguais, e a variação de R foi pequena, mas com o modelo de calha em V sempre menor que o CPC. Porém, a variação na concentração, que é o mais importante, foi maior em ambos os ângulos δ , mas com uma considerável diferença quando $\delta = 5,7^\circ$, o que colocou a calha em V em grande desvantagem para este ângulo.

2.6.1 CONCENTRADORES DE SEGUNDO ESTÁGIO

De acordo com Rabl (1976), o modelo de concentrador solar CPC se torna impraticável se a concentração for maior do que 10 devido à dimensão necessária para que isso seja atingido. Então a opção apresentada pelo autor sugere que para um pequeno ângulo de aro ϕ faz com que o CPC seja muito profundo e a refração $\langle n \rangle$ seja alta. Se $10^\circ < \phi < 30^\circ$, o concentrador CPC estará projetado na região de maior concentração e $\langle n \rangle < 1$. E se $\phi > 30^\circ$ é desejável que este seja utilizado como segundo refletor, por exemplo, em concentrador de torre central como a configuração esquematizada na Figura 2.19. E os fatores de concentração para duas e três dimensões, respectivamente, são:

$$C_{2\ dim} = \psi \cos(\phi + \delta) C_{2\ dim\ ideal} \quad (24)$$

e

$$C_{3\ dim} = \psi \cos^2(\phi + \delta) C_{3\ dim\ ideal} \quad (25)$$

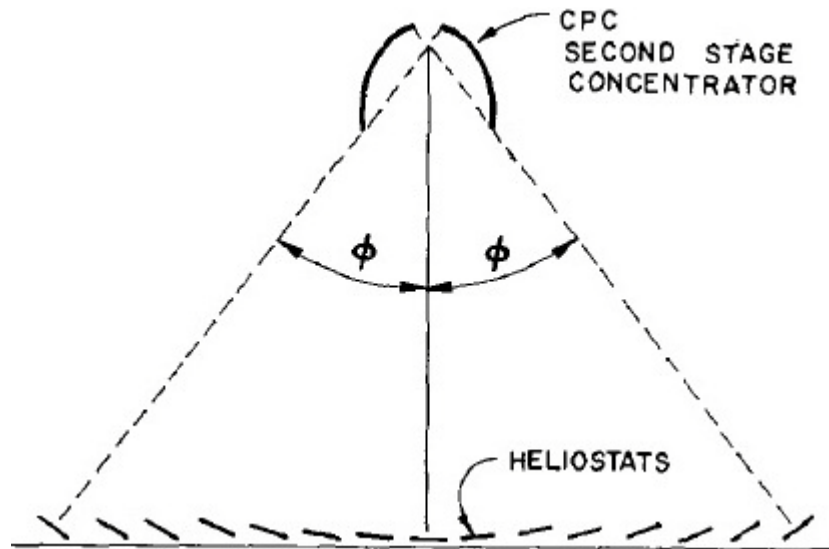


Figura 2.19 Perfil de concentrador Fresnel com um concentrador secundário tipo CPC próximo à zona focal (RABL, 1976)

Rabl (1976) também citou alterações no modelo do concentrador secundário utilizando a calha com perfil em V. De acordo com o autor, o direcionamento dos heliostatos é de forma com que os espelhos posicionados ao centro do campo, são direcionados ao centro do absorvedor. E os espelhos do lado direito do campo são direcionados de modo que a fronteira do lado esquerdo do mesmo reflita a radiação para o lado esquerdo do absorvedor.

A figura 2.20 ilustra as comparações entre as concentrações no absorvedor com e sem os coletores secundários, em termos de ângulo de borda, representada nas abscissas, e, no eixo das ordenadas, a relação entre a concentração ideal e a proporção de cobertura do terreno.

Conforme Rabl (1976), a linha sólida representa o concentrador CPC em segundo estágio. A linha traço ponto representa o calha em V como segundo estágio. A linha tracejada representa o absorvedor plano, sem concentrador de segundo estágio, e a linha pontilhada representa o absorvedor esférico, também sem o concentrador de segundo estágio.

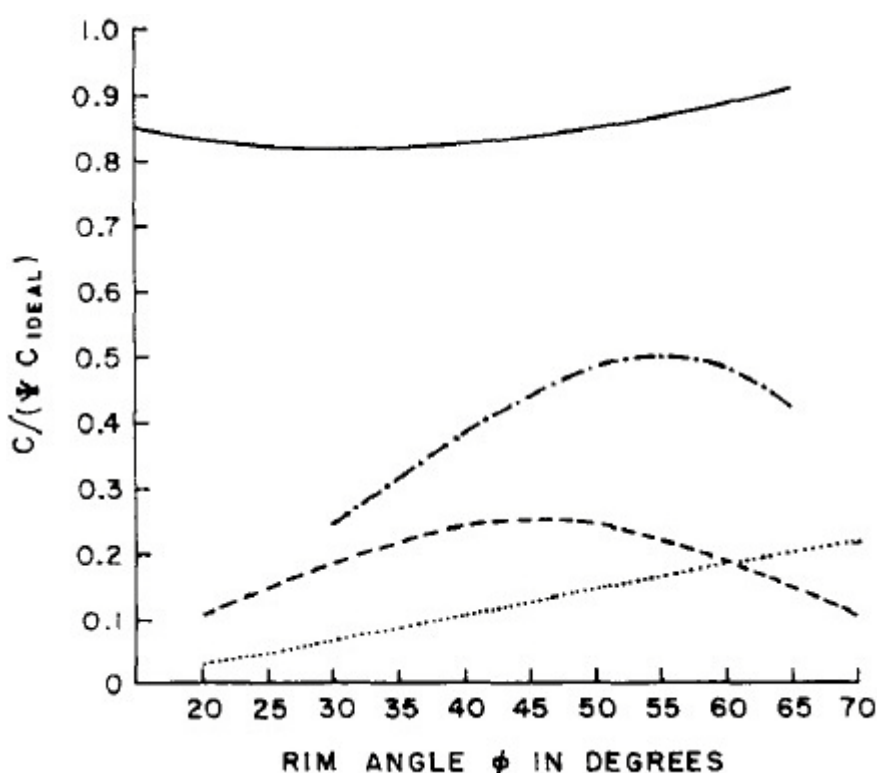


Figura 2.20 Concentração do receptor central com e sem concentrador de segundo estágio. A linha sólida representa o concentrador CPC em segundo estágio. A linha traço ponto representa o calha em V como segundo estágio. A linha tracejada representa o absorvedor plano. E a linha pontilhada representa o absorvedor esférico (RABL, 1976).

Para um dado ângulo 2δ , concentradores Fresnel com um concentrador secundário tipo CPC atinge uma concentração aproximadamente 4 vezes maior do que as configurações sem o CPC secundário. Porém, segundo Rabl (1976), isso é muito dependente de δ_m , pois se $\delta_m = \delta_s = 4,7 \text{ mrad}$, o que é insignificante se comparado ao θ_c , e δ_m é a somatória dos erros dos refletores primários e secundários, a concentração é aproximada tanto na configuração com o concentrador secundário quanto na configuração sem este último. E isso também demonstra que a precisão dos espelhos tem forte influência econômica sobre o projeto.

2.7 COLETORES FORMADORES DE IMAGEM

O efeito da alta razão de concentração de alguns modelos de concentradores solares é o aparecimento de uma imagem na região de absorção dos coletores, uma vez que a razão de concentração é efeito da geometria dos concentradores e da precisão do método de construção, sendo que esta última altera qualidade da imagem com menor intensidade do que a primeira.

Os modelos discutidos nas seguintes subseções foram divididos em dois grupos, pelos quais se definem pelo formato da imagem no foco em linear, que são os concentradores parabólicos lineares (PTC - Parabolic Trough Collector) e os concentradores Fresnel, e imagem pontual, que são os concentradores parabólicos e coletores de receptores centrais.

2.7.1 IMAGEM LINEAR

Entre os tipos de concentradores, o parabólico linear é o que mais se encontra na literatura. De acordo com a Figura 1.1.1, 57% das demandas térmicas nas indústrias é de baixa e média temperatura. Conforme Duffie e Beckman (2006), este modelo é aplicável em sistemas que demandam temperaturas de 100°C a 500°C, enquanto que Kalogirou (2009), afirma que este tipo de concentrador pode produzir calor a temperaturas de 50°C a 400°C. Porém, se a demanda de temperatura for menor que 100°C provavelmente o coletor analisado por Duffie e Beckman (2006) pode aquecer um fluido a demandada baixa temperatura.

O coletor PTC é formado por folhas ou chapas de algum material com alta refletividade flexionada e apoiada sobre um suporte de tal maneira formando um perfil parabólico. Este espelho refletirá a radiação solar em um tubo metálico preto, que normalmente é envolvido por uma cobertura transparente, com o espaço evacuado entre estes, para que diminua as perdas térmicas. Mas também se usam receptores planos para este tipo de concentrador. A Figura 2.21 mostra um coletor pertencente a uma usina solar térmica na Califórnia (DUFFIE e BECKMAN, 2006).

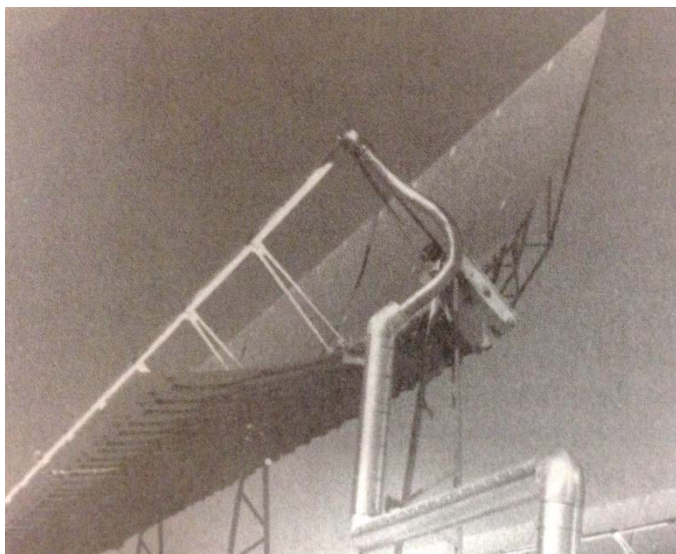


Figura 2.21 - Concentrador parabólico tipo calha parabólica (DUFFIE e BECKMAN, 2006)

De acordo com Kalogirou (2009), o coletor solar parabólico pode ser alinhado tanto no eixo leste-oeste quanto no eixo norte sul. No período de um ano o concentrador coleta um pouco mais de energia na segunda posição do que na primeira. Entretanto, na posição norte-sul, o concentrador coleta mais energia durante o verão do que o concentrador alinhamento ao eixo leste-oeste, que diariamente, coleta mais energia quando o sol está próximo ao meio dia, porém menos ao amanhecer e entardecer.

Apesar de menor quantidade total, o fornecimento de energia, com alinhamento do eixo na direção leste-oeste é mais constante durante o ano. A escolha do posicionamento depende da aplicação e se a demanda é maior durante o inverno ou verão.

Para análise deste coletor é necessário descrever as propriedades ópticas. A radiação absorvida por unidade de área de abertura sem sombra, S , é calculada pela equação (37). Assumindo um concentrador perfeito, formando uma imagem teoricamente perfeita, a Figura 2.22 e a Figura 2.23 mostram seções do concentrador parabólico com o perfil segundo a equação $y^2 = 4fx$.

E o raio r da parábola é dado por:

$$r = \frac{2f}{1 + \cos \varphi} \quad (41)$$

Assumindo que o concentrador é simétrico e que a radiação incide perpendicular ao plano de abertura, e que o Sol incide a radiação direta em formato cônico, com abertura angular de $0,53^\circ$ (meio ângulo $\theta_s = 0,267^\circ$ ou $16'$), a Figura 2.24 ilustra a radiação refletida da borda do concentrador tanto para absorvedores tubulares quanto para semicirculares e planos.

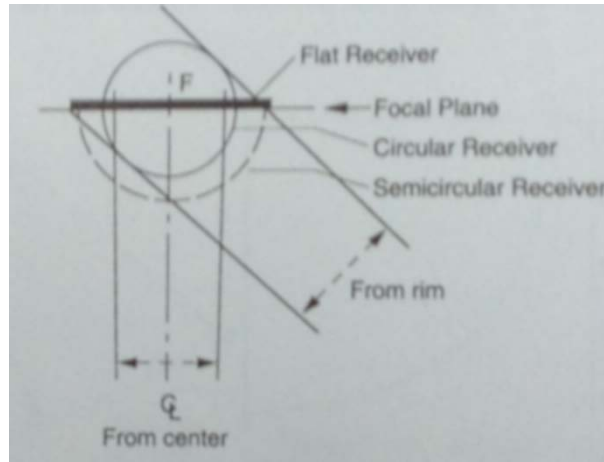


Figura 2.24 Esquema da radiação refletida da borda do concentrador incidente em um absorvedor de perfil circular, de perfil semicircular e de perfil plano (DUFFIE e BECKMAN, 2006).

Desconsiderando as imperfeições de reflexão devido à imperfeição superficial do espelho, para um absorvedor de perfil circular, em um refletor parabólico especular, o diâmetro D é dado pela seguinte equação.

$$D = 2r_r \sin \theta_s = \frac{a \sin \theta_s}{\sin \varphi_r} \quad (42)$$

E para um receptor plano, φ varia de zero a φ_r , r varia de f a r_r e a largura w varia de D (com $r_r = f$) à w . A largura w é dada por:

$$w = \frac{a \sin \theta_s}{\sin \varphi_r \cos(\varphi_r + \theta_s)} \quad (43)$$

Considerando um plano perpendicular ao eixo da parábola (linha que une o foco e o vértice) Duffie e Beckman (2006) detalharam teoricamente a imagem assumindo um concentrador perfeito, quer dizer, sem erros na reflexão. Assumindo que o Sol é um disco, a radiação incidente no refletor tem, um formato de cone com vértice na parábola e com abertura de $32'$ (ou meio ângulo $\theta_s = 16'$). A reflexão também será em formato cônico com o mesmo ângulo.

Considerando um receptor plano e perpendicular ao eixo de simetria, e no foco do mesmo, assume-se que a radiação solar incide perpendicularmente ao plano de abertura. Então, a imagem formada pela reflexão de um elemento de área da parábola terá um formato elíptico com o diâmetro menor de $2r \sin 16'$, e o maior, $y_1 - y_2$. Sendo que $y_1 = r \sin 16' / (\varphi - 16')$ e $y_2 = r \sin 16' / (\varphi + 16')$. Integrando-se todos os elementos de área da parábola, ter-se-ia a imagem teórica completa do concentrador.

As Figuras 2.25 (a) e (b) mostram razões de concentração de concentradores com diferentes ângulos de borda, em diferentes pontos do absorvedor. A razão de concentração local $C_l = I_{(y)} / I_{b,ap}$ é a intensidade de incidência de radiação em qualquer posição y da Figura 2.23, sobre a intensidade da incidência de radiação na abertura da parábola, assumindo a refletância igual a 1.

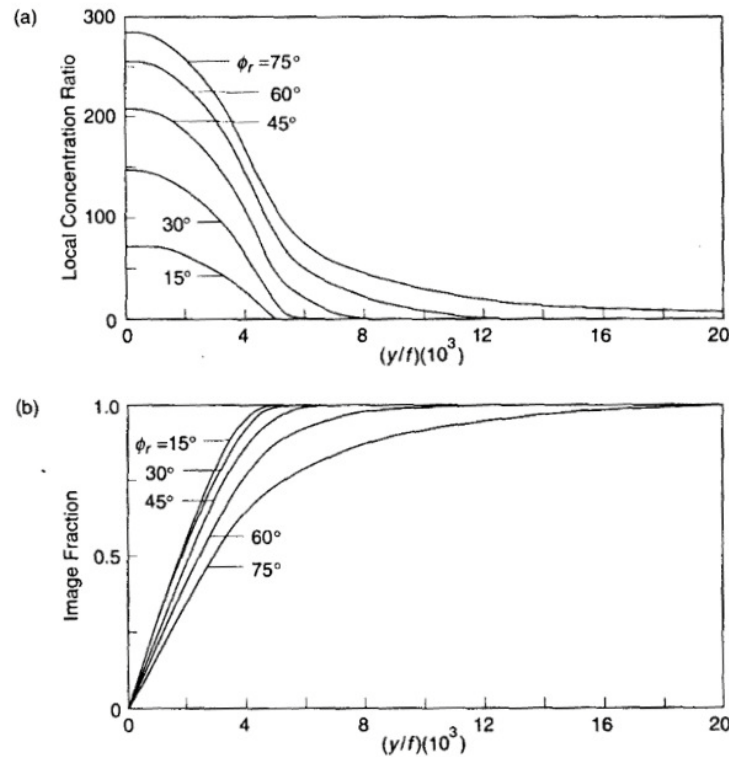


Figura 2.25 a) Distribuição da concentração na imagem para concentrador com refletor ideal e disco solar não uniforme, e b) Fator de interceptação para o mesmo concentrador (DUFFLE e BECKMAN, 2006).

A Figuras 2.25 (a) mostra que a razão de concentração aumenta com o aumento do ângulo de borda até 75° , bem como o tamanho da imagem. Duffie e Beckman (2006) assumiram que o Sol emite mais intensamente no ponto central do disco. Integrando a razão de concentração de zero até y/f , têm-se o fator de interceptação, γ .

As Figuras 2.25 (a) e (b) e a equação (43) consideram que a orientação do concentrador seja perfeita, em que a radiação é perpendicular ao plano de abertura.

Entretanto, Duffie e Beckman (2006) afirmaram que há variações na incidência de radiação nos planos xy e xz da Figura 2.23, devido aos erros na orientação.

Se a radiação incidente do disco solar para um ponto qualquer na parábola estiver normal a um eixo qualquer paralelo ao eixo y, do plano xy, teria o meio ângulo $\theta_s = 16'$ em ambos os lados deste raio incidente. No entanto, a radiação normal a esse eixo paralelo ao eixo y, pode incidir de qualquer ponto do disco solar, o que causa uma variação no fluxo de radiação em um ponto qualquer na imagem do foco do concentrador, dentro do plano xy. Esse efeito é proporcional ao ângulo de borda.

Em qualquer orientação possível para o concentrador parabólico linear, a radiação incidente será normal ao plano de abertura do concentrador. Conforme o ângulo de incidência θ aumenta no plano xz, o meio ângulo $\theta_s = 16'$ aparentemente aumenta em $1/\cos \theta$. A equação seguinte define esse efeito na largura W da imagem.

$$W = \frac{2r_r \sin(\theta_s / \cos \theta)}{\cos(\varphi_r + \theta_s / \cos \theta)} \quad (44)$$

Em um concentrador com o eixo orientado de leste a oeste a largura do foco é maior nas primeiras e nas últimas horas do dia, enquanto que ao meio dia, a imagem mostrará menor largura. E na orientação norte-sul, esse efeito é invertido. A equação abaixo mostra esse efeito pela razão entre a largura em $\theta = 0$ e o θ real.

$$\frac{W}{W_0} = \frac{\sin(\theta_s / \cos \theta)}{\sin \theta_s} \frac{\cos(\varphi_r + \theta_s)}{\cos(\varphi_r + \theta_s / \cos \theta)} \approx \frac{1}{\cos \theta} \quad (45)$$

Até este ponto foram considerados somente os erros de orientação do concentrador, mas ainda com a superfície do refletor perfeita. As Figura 2.26 (a) e (b) mostram a variação da concentração local do concentrador com ângulo de borda de 30° e 75° , quando este possui um pequeno erro bidimensional na inclinação da superfície.

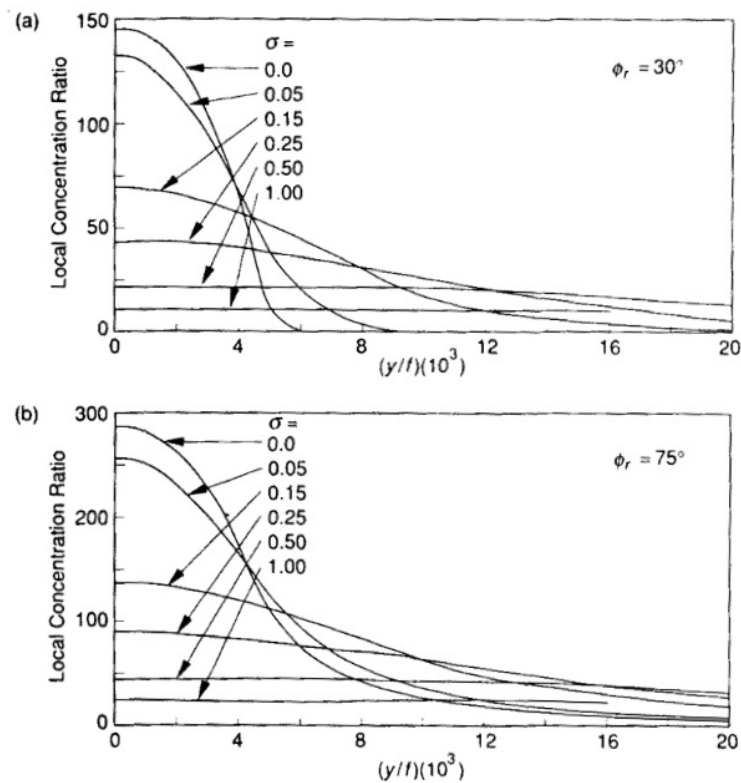


Figura 2.26 Distribuição da imagem de concentradores com ângulos de borda de a) 30° e b) 75° , com refletores imperfeitos para vários desvios padrões dos erros da superfície do refletor (DUFFIE e BECKMAN, 2006).

A equação seguinte é para o cálculo do diâmetro do cilindro do receptor considerando o ângulo de dispersão δ , que está mais bem ilustrado pela Figura 2.27, e que é somado ao ângulo do cone do disco após a reflexão na superfície da parábola.

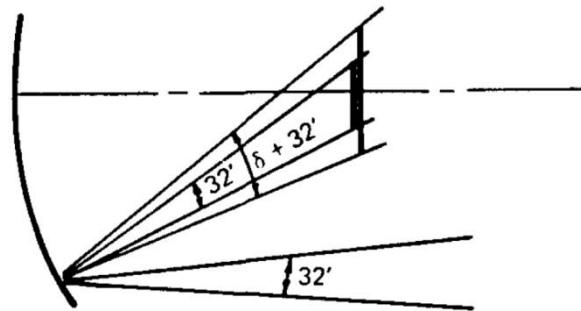


Figura 2.27 Esquema da incidência da radiação solar com abertura de $32'$ e da reflexão do espelho com a dispersão δ somada à abertura do cone (DUFFIE e BECKMAN, 2006).

$$D = 2r_r \sin(\theta_s + \delta/2) \quad (46)$$

Este erro também é considerado no cálculo da largura da imagem em um plano paralelo ao plano de abertura do concentrador. O cálculo de W com os erros de reflexão é dado pela seguinte equação.

$$W = \frac{2r_r \sin(\theta_s + \delta/2)}{\cos(\varphi_r + \theta_s + \delta/2)} \quad (47)$$

As equações (46) e (47) não consideram os erros pela orientação, considerados na equação (44). Porém, isso se faz substituindo θ_s por $\theta_s/\cos \theta$. Mas, assumindo o alinhamento perfeito, a razão máxima de concentração, $C_{\text{máx.}}$, do concentrador parabólico linear pode ser obtida pela razão de $(W/a)_{\gamma=1}$, na qual é assumido que o absorvedor intercepta toda a radiação refletida. A seguinte equação calcula a máxima razão de concentração.

$$C_{\text{máx}} = \frac{\sin \varphi_r \cos(\varphi_r + \theta_s + \delta/2)}{\sin(\theta_s + \delta/2)} - 1 \quad (48)$$

Para estimar o efeito do desvio δ se utiliza a metodologia *Ray Tracing*. Esse método é baseado em um sistema de vetores que segue o caminho da radiação incidente para um sistema óptico para determinar a distribuição da radiação em uma superfície de interesse.

Para o concentrador, sendo formado por uma superfície reflexiva, deve se determinar o ponto de intersecção de um raio incidente com a superfície do concentrador, bem como a normal à esta. A Figura 2.28 ilustra essa metodologia aplicada em um coletor CPC. Claro que, para que o efeito do desvio δ na imagem do concentrador seja conhecido devem-se conhecer as imperfeições superficiais ocorridas na metodologia da construção.

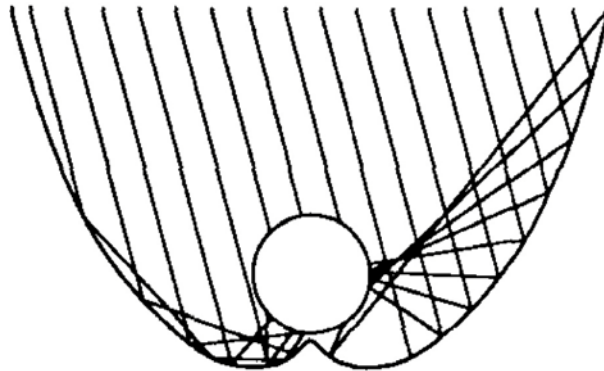


Figura 2.28 Diagrama Ray Trace para o coletor CPC (DUFFIE e BECKMAN, 2006).

O modificador de ângulo de incidência κ , visto na equação (37) no formato $\kappa_{\gamma\tau\alpha}$ varia com $\gamma(\theta)$. A variação do fator de interceptação também influencia na variação de τ e α . Como discutido anteriormente, o fator de interceptação varia nos planos xy e xz, mas Duffie e Beckman (2006) acrescentaram que se o concentrador for curto o suficiente, outro efeito pode influenciar o valor de S, pois o final do concentrador gerará o final da imagem além do final do receptor. Além de que, a variação do ângulo de incidência θ

modifica os valores da transmitância τ da cobertura, e da absorbância ρ do absorvedor. Portanto, para o cálculo de S , os fatores ρ, τ, α e γ devem ser verificadas e então, $\kappa_{\gamma\tau\alpha} = 1/\cos \theta$.

Mesmo assim, o valor de γ não é bem definido porque as fronteiras da imagem não são bem definidas. A realização de cálculos junto com a utilização da metodologia *Ray Trace* traz melhor proximidade para o cálculo de γ .

2.7.2 IMAGEM PONTUAL

A análise para o concentrador de três dimensões é similar à análise para concentradores parabólico linear. A imagem da Figura 2.22 e Figura 2.23 é análoga para a análise do ângulo de borda ϕ_r e raio r para concentradores paraboloidais. As dispersões também ocorrem. O fator de concentração máximo pode ser escrito considerando os erros do refletor para os receptores esféricos como:

$$C_{m\acute{a}x} = \frac{\sin^2 \phi_r}{4 \sin^2(\theta_S + \delta/2)} - 1 \quad (49)$$

Também são utilizados receptores de cavidade, por possuírem alta absorvidade e baixa perda por convecção. Para efeito de cálculo da concentração máxima, estes tipos de receptores são considerados como os receptores planos. A seguinte equação se utiliza para ambos.

$$C_{m\acute{a}x} = \frac{\sin^2 \phi_r \cos^2(\phi_r + \theta_S + \delta/2)}{4 \sin^2(\theta_S + \delta/2)} - 1 \quad (50)$$

É comum não utilizar a cobertura nestes receptores, como foi utilizada nas discussões dos coletores parabólicos lineares, porque pela alta razão de concentração atingidas pelos concentradores paraboloidais, a temperatura da cobertura é relativamente alta, mas se houver esta cobertura, é utilizada a equação (37) para o cálculo da energia absorvida por unidade de área, S . Caso contrário, utiliza-se a seguinte equação:

$$S = I_{b,a} \rho(\gamma\alpha)_n K_{\gamma\alpha} \quad (51)$$

Existe outro tipo de concentrador paraboloidal que é o tipo Scheffler, que é formado por uma seção lateral de uma parábola, com uma inclinação de $43,23^\circ$ em

relação à diretriz. A diferença entre este tipo e o mencionado anteriormente é que nesse último, o vértice da parábola se localiza na região central do refletor, e no tipo Scheffler, fora da zona de reflexão. Então, o outro modelo necessita de uma área de reflexão menor do que neste modelo para uma mesma quantidade de energia, porém, a imagem formada pelo tipo Scheffler fica localizada na frente deste, sendo possível trabalhar com a energia concentrada, na sombra. Na Figura 2.29 está ilustrado um concentrador do tipo Scheffler, onde também é possível ver o caminho da radiação solar no verão e no inverno.

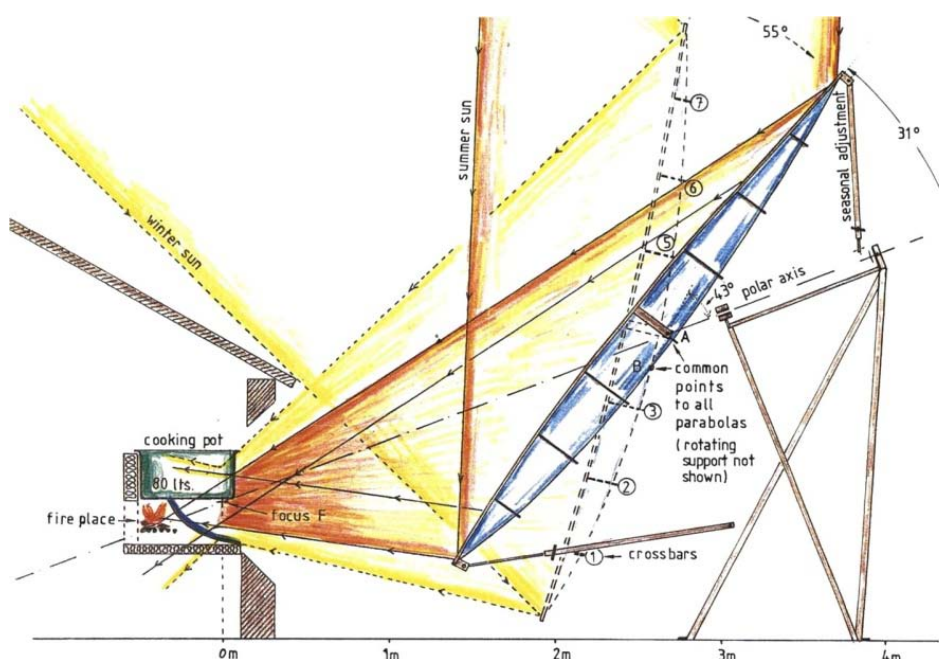


Figura 2.29 - Concentrador solar tipo Scheffler (SCHEFFLER, 2010)

Outro concentrador solar formador de imagem com o formato do foco em ponto, são os chamados Coletores Receptores Centrais, ou torre de potência. Este tipo de coletor concentrador solar é formado por vários heliostatos, individualmente posicionado em tais ângulos tal que a radiação solar é refletida para um mesmo ponto, na parte superior de uma torre neste campo. Isso resulta em um tipo de concentrador do modelo de Fresnel. A Figura 2.30 expõe uma imagem deste tipo de concentrador solar.



Figura 2.30 - Coletor concentrador solar de receptor central.

No Coletor Receptor Central os heliostatos são dispostos sem a necessidade de simetria ou de estarem em um mesmo plano. Possuem altas razões de concentração e geralmente são utilizados para geração de energia elétrica. Para um receptor esférico, a concentração máxima é dada pela seguinte equação:

$$C_{m\acute{a}x} = \psi \frac{\sin^2 \phi_r}{4 \sin^2(\theta_s + \delta/2)} - 1 \quad (52)$$

E para um receptor plano, pela seguinte:

$$C_{m\acute{a}x} = \psi \left[\frac{\sin \phi_r \cos(\phi_r + \theta_s + \delta/2)}{\sin^2(\theta_s + \delta/2)} \right]^2 - 1 \quad (53)$$

O forno de Odeillo (Figura 2.31), situado na França, foi construído para produção de altas temperaturas, para a utilização industrial. Neste forno, o concentrador foi construído com espelhos, formando a parábola, e por heliostatos, que fazem o rastreamento da radiação solar redirecionando-os para o concentrador, que por sua vez, reflete esta radiação para o receptor. Chegando à temperatura de até 3600°C, este forno pode ser utilizado para fundição, geração de energia elétrica, produção de hidrogênio, entre outras aplicações.



Figura 2.31 Forno de Odeillo (Wikipedia: acessado em 12/12/12).

Depois do detalhamento dos modelos dos concentradores solares, foi feita uma pesquisa quanto aos fabricantes disponíveis os modelos oferecidos, bem como a disponibilidade comercial dos concentradores.

3 COLETORES SOLARES CONCENTRADORES COMERCIAIS

Nesse capítulo foram descritos alguns fabricantes de coletores concentradores que são comercializados e outros que estão em fase de teste. Entre os modelos apresentados na sequência estão o coletor concentrador parabólico linear e o coletor tipo Fresnel linear.

3.1 COLETORES SOLARES CONCENTRADORES FABRICADOS POR PARASOL

O coletor concentrador parabólico linear PARASOL possui dimensões de 0,5 m x 4 m, e o receptor fica a 100 mm do vértice da parábola, no qual possui cobertura de vidro não evacuado. A Figura 3.1 ilustra o coletor concentrador.



Figura 3.1 Coletor concentrador parabólico linear PARASOL (IEA, 2005).

É indicado para operações industriais entre 100 e 200 °C. Não foi realizado o teste estático, mas numericamente o coletor atingiu 600 °C. A Figura 3.2 mostra um gráfico de influência comparativa entre resultados experimentais (pontos quadrados), e

numericamente com o receptor evacuado (linha pontilhada) e com o receptor sem vácuo (linha).

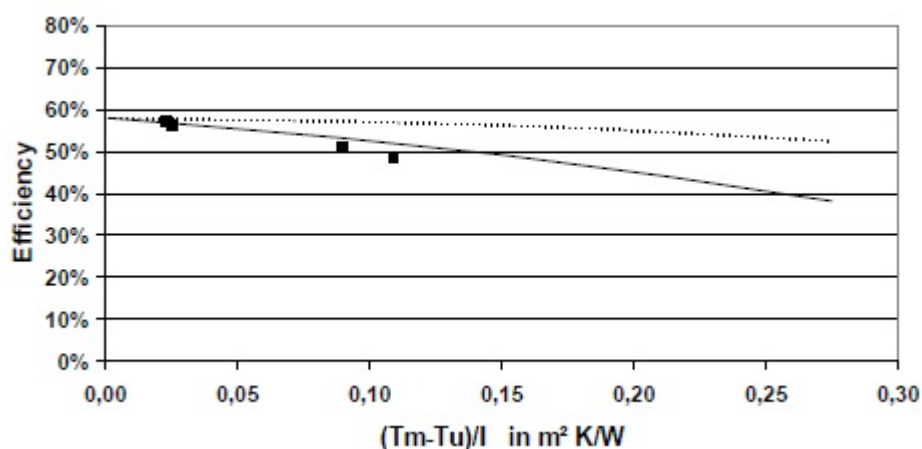


Figura 3.2 Comparativo entre resultados experimentais (pontos quadrados), e numericamente com o receptor evacuado (linha pontilhada) e com o receptor sem vácuo (linha) (IEA, 2005).

O rendimento inicial numérico foi de 0,58. E nos testes realizados foi utilizado um coletor com área de abertura de 7,5 m², demonstrando a potência máxima de 3 kW.

3.2 COLETORES SOLARES CONCENTRADORES FABRICADOS POR SOLITERM

A SOLITERM apresenta dois modelos de coletores concentradores parabólicos lineares: PTC 1800 e PTC 1000.

Com refletor de alumínio, o modelo PTC 1800, ilustrado na Figura 3.3 possui área de abertura de 9 m² e o material do absorvedor é um tubo de aço inox com pintura seletiva e diâmetro de 38 mm. O receptor é envolvido por vidro não evacuado. E, de acordo com o fabricante, este modelo atende a temperaturas de operação acima de 200°C



Figura 3.3 SOLITERM PTC 1800 (IEA, 2005).

O modelo de coletor concentrador linear PTC 1000, da Figura 3.4 possui dimensões de 2 m x 1 m e é constituído de refletores do fabricante Alanod, mas não especificou qual foi o refletor utilizado. A refletância dos refletores da Alanod varia entre 0,85 e 0,98. Indicado para utilização em operações acima de 300°C, o receptor possui cobertura de vidro com uma camada de antirreflexo.



Figura 3.4 SOLITERM PTC 1000 (IEA, 2005).

Em análise experimental de estagnação, este concentrador atingiu a temperatura de 590°C, e demonstrou eficiência $\eta_0 = 0,75$ e potência máxima de 1 kW. Com a incidência de radiação de 800 W/m² e temperatura de saída de 300°C, a

eficiência demonstrada foi de 60%. A Figura 3.5 demonstra um gráfico comparativo entre análise teórica e experimental.

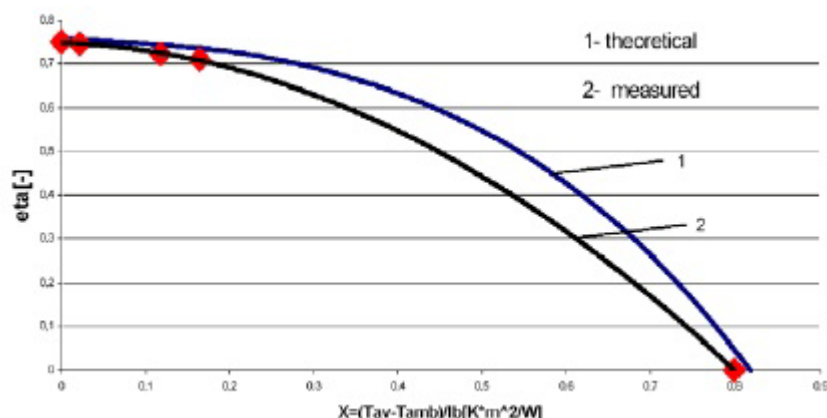


Figura 3.5 Comparativo entre análise teórica e experimental (IEA, 2005).

3.3 COLETORES SOLARES CONCENTRADORES FABRICADOS POR FASOL

O concentrador parabólico linear da FASOL possui área de abertura de 2,62 m² com a distância entre o receptor e o vértice de 0,7 m. O refletor é constituído de vidro temperado com refletância variando entre 0,8 e 0,84. Indicado para faixa de operação entre 130°C e 300°C, o coletor concentrador da FASOL possui eficiência teórica variando entre 0,70 e 0,75.



Figura 3.6 Coletor concentrador parabólico FASOL (IEA, 2005).

Na data da publicação, este modelo estava sendo testado. E a estimativa de preço para comercialização era de 150,00 €/m² para projetos com área aproximada de 1000 m².

3.4 COLETORES SOLARES CONCENTRADORES FABRICADOS POR HEINRICH

A Heinrich fornece coletores concentradores do tipo Fresnel linear e inclinável, podendo ser instalado tanto em superfícies planas quanto em inclinadas. O sistema é modular, podendo ser aplicado para a conversão de energia da ordem de grandeza de 10^3 kW.



Figura 3.7 Coletor concentrador Fresnel, construído por Heinrich (IEA, 2005).

Cada módulo é constituído de seis refletores com dimensões de 6 m x 0,5 m, totalizando 18 m² de refletores por módulo. A distância entre o receptor e o refletor mais próximo é de 2,5 metros. Na data da publicação, este concentrador estava em fase experimental, e possuía estimativa de preço de 200,00 €/m².

3.5 COLETORES SOLARES CONCENTRADORES FABRICADOS POR SOLARMUNDO

O coletor fornecido pela Solarmundo é um concentrador do tipo Fresnel com dimensões de 100 m x 25 m com a área de abertura de 2500 m². A razão de concentração varia entre 30 e 100. E é indicado para processos que necessitam de temperaturas acima de 400 °C, com um pico de potência de 1 MW.



Figura 3.8 Coletor concentrador Fresnel, fornecido pela Solarmundo (IEA, 2005).

Teoricamente, a eficiência do coletor concentrador Fresnel da Solarmundo atinge $\eta_0 = 0,65$. De acordo com IEA (2005), a estimativa de custo para este tipo de concentrador está entre 120,00 e 150,00 €/m².

A Tabela 3.1 relaciona os concentradores solares citados neste capítulo e as principais características como área de abertura, potência por área de abertura e eficiência.

Tabela 3.1 Relação entre modelos de concentradores solares

Fabricante	Modelo	Tipo	Área de abertura, [m ²]	Distância entre o vértice e o foco, [m]	Potência, [kW/m ²]	Eficiência	Temperatura de operação, [°C]
Parasol	PARASOL	Parabólico linear	2	0,1	0,4	0,58	100 - 200
Solitem	PTC 1800	Parabólico linear	9	0,78	Não informado	Não informado	100 - 200
Solitem	PTC 1000	Parabólico linear	2	-	0,5	0,6	80 - 300
Fasol	FASOL	Parabólico linear	2,62	0,7	-	0,70 - 0,75	130 - 300
Heinrich		Fresnel linear	36	2,5	-	-	100 - 200
Solarmundo	Linear concentrating Fresnel Collector	Fresnel linear	2500		0,4	0,65	100 - 400

4 POTENCIAL DE ENERGIA SOLAR EM UM PONTO DO BRASIL

O objetivo deste capítulo é realizar uma demonstração de cálculo da energia fornecida por um determinado concentrador em uma determinada localidade, para avaliar o funcionamento dos concentradores solares disponíveis para comercialização. Para isso, foi feita uma análise para a escolha de uma localidade no território brasileiro a fim de tornar o exemplo mais realista.

Na primeira etapa foi feita uma análise da radiação incidente no Brasil do atlas solarimétrico. Na sequência foi feita a escolha do local para que seja utilizado como referência para os cálculos da radiação solar incidente no coletor solar. Feito a escolha, realizou-se o cálculo da radiação disponível naquela região, comparando-a com as informações do atlas solarimétrico. Por último foi avaliado a produção de vapor por um determinado coletor concentrador discutido no capítulo 3.

4.1 ATLAS SOLARIMÉTRICO

Conforme Pereira **et al.** (2006) as imagens das Figura 4.1 e Figura 4.2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostram uma estimativa média da radiação incidente no território brasileiro por meio de dados coletados em um período de 10 anos. Entre os anos de 1995 e 2005. Os valores da radiação solar incidente em qualquer região do Brasil (4200 – 6700 kWh/m²) são superiores a maioria dos países da união europeia (média máxima de 1850 kWh/m², na Espanha). As Figura 4.1 e Figura 4.2 mostram a irradiação solar global média diária em um plano horizontal no período de um ano e em cada estação do ano, respectivamente, com o valor máximo de 6,5 kWh/m², no estado da Bahia.

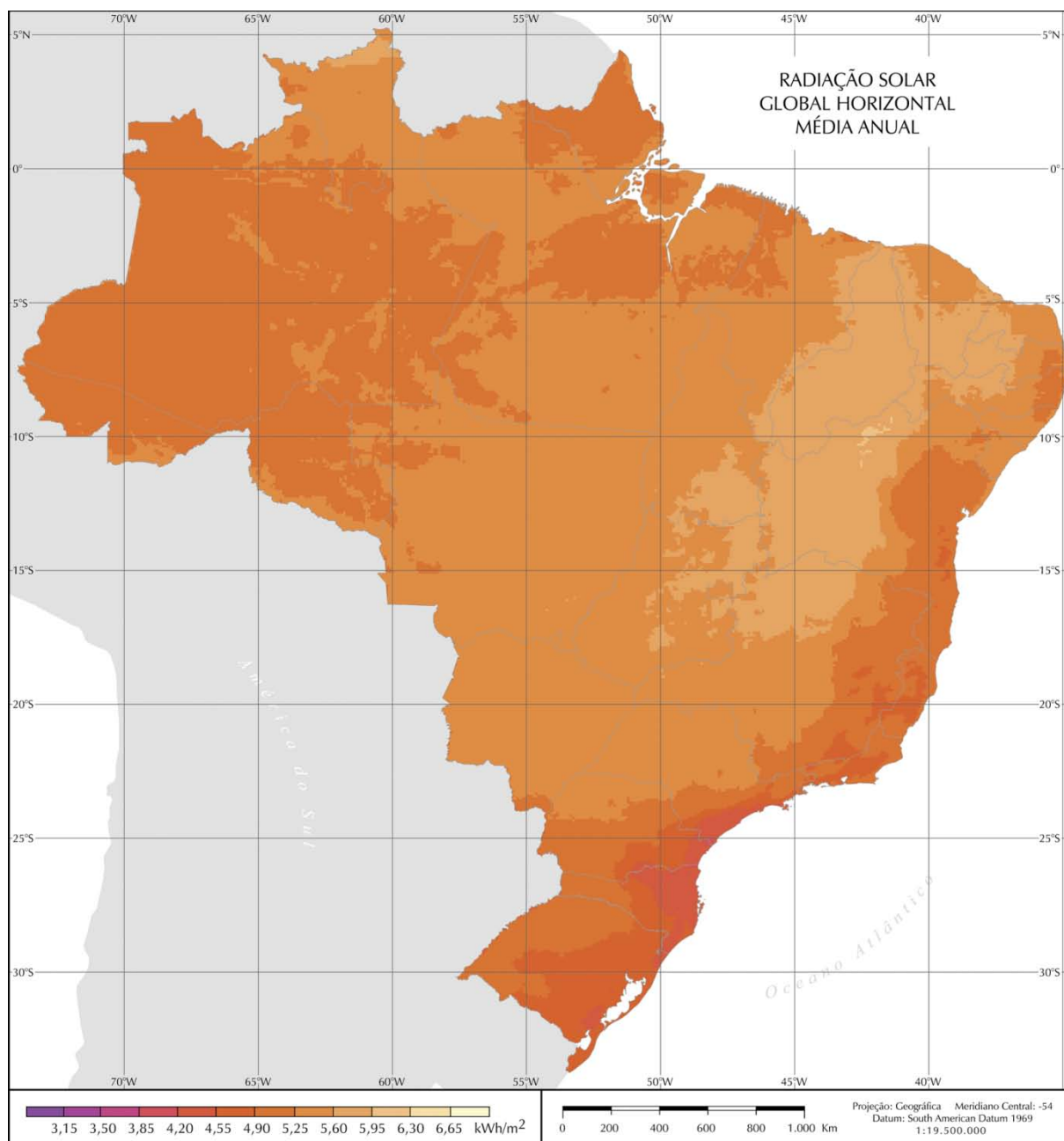


Figura 4.1 Estimativa média da radiação solar global no plano horizontal em um ano (PEREIRA *et al.*, 2006).

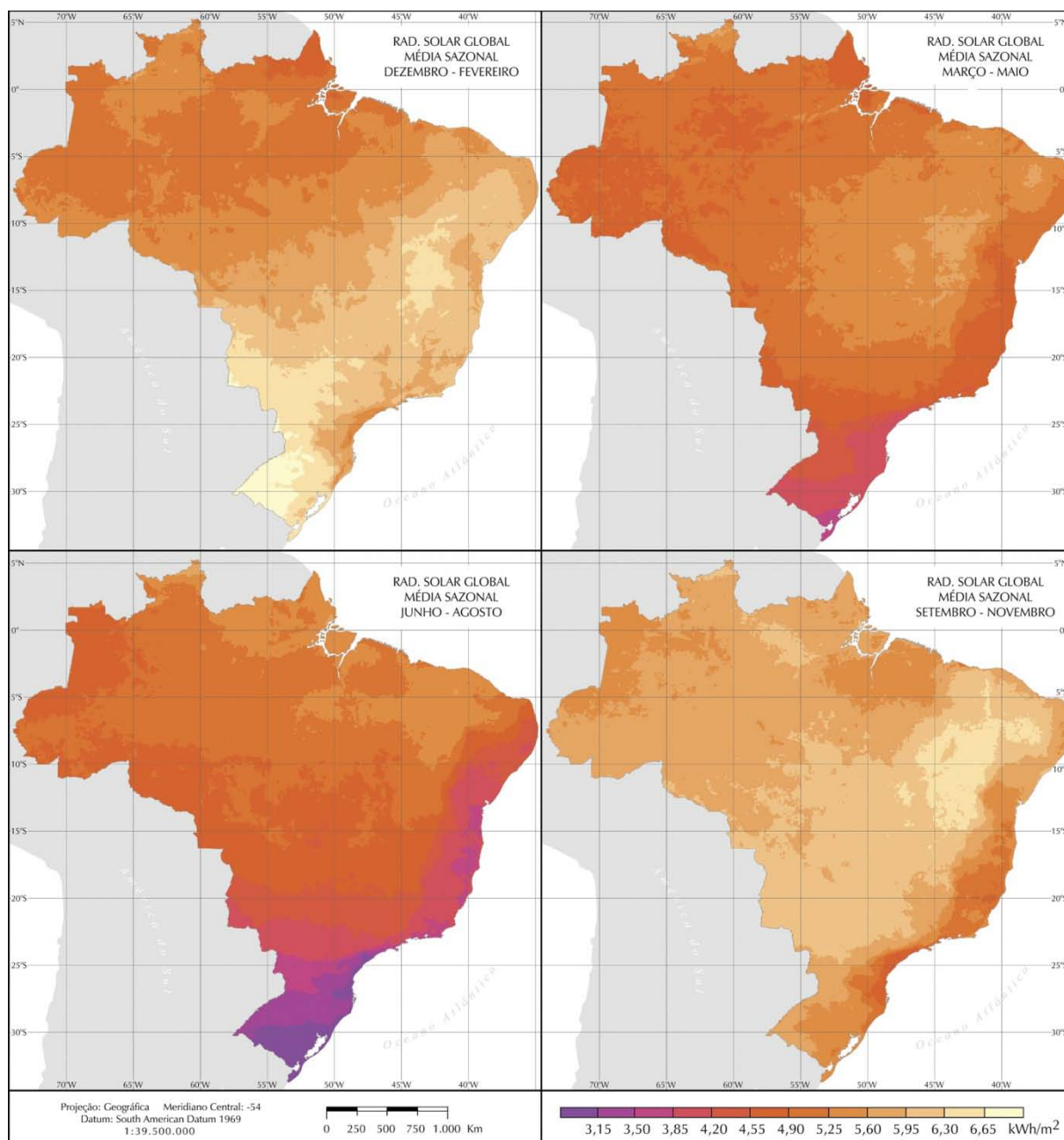


Figura 4.2 Estimativa média da radiação solar global no plano horizontal para cada estação do ano (PEREIRA *et al.*, 2006).

4.2 LOCAL ESCOLHIDO

O local escolhido para o cálculo da radiação solar incidente no plano horizontal a cidade de São Paulo, mais precisamente na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, em um ponto em que a latitude e a longitude são $23^{\circ}33' S$ e $46^{\circ}44' O$.

4.3 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL

Pelo mapa da Figura 4.1, a região Norte da Cidade de São Paulo recebe uma média diária anual de irradiação aproximadamente de 4,9 kWh/m², com a média sazonal mínima e máxima de 3,9 e 6,3 kWh/m², respectivamente (Figura 4.2).

Para calcular a incidência de radiação solar direta no plano de abertura do concentrador solar, foi adotado um valor de 6 kWh/m² (21,6 MJ/m²), obtido através de interpolação com a radiação extraterrestre, para a incidência de radiação diária no dia médio de dezembro.

4.4 AVALIAÇÃO DA RADIAÇÃO DIRETA

Foi avaliada a disponibilidade de incidência de radiação solar na área do plano de abertura do concentrador solar. A tabela 4.1 mostra a incidência diária de radiação solar no plano horizontal em um dia médio do mês, H .

Tabela 4.1 Incidência diária de radiação solar no dia médio de cada mês, H .

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
MJ/m ²	16	16	14	12	10	10	11	12	13	16	16	16

Com esses dados, o ângulo de declinação para cada dia médio foi calculado através da seguinte equação, segundo Duffie e Beckman (2006):

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right) \times (0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \sin B - 0,006758 \cos 2B + 0,000907 \sin 2B - 0,002697 \cos 3B + 0,00148 \sin 3B) \quad (54)$$

Sendo que o coeficiente B é dado por:

$$B = (n - 1) \times \left(\frac{360}{365}\right) \quad (55)$$

A equação para cálculo do ângulo horário ω , da radiação extraterrestre média H_0 , e do índice de claridade K_T , e a radiação direta H_d foram calculadas com as seguintes equações:

$$\cos \omega = -\tan \varphi \tan \delta \quad (56)$$

$$H_0 = \frac{24 \times 3600}{\pi} \times G_{sc} \times \left(1 + 0,033 \times \frac{360n}{365}\right) \quad (57)$$

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (58)$$

$$H_b = H \times (1 - 1,391 - 3,56K_T + 4,189K_T^2 - 2,137K_T^3) \quad (59_a)$$

Para $\omega \leq 81,4^\circ$ e $0,3 \leq K_T \leq 0,8$, e

$$H_b = H \times (1 - 1,311 - 3,022K_T + 4,427K_T^2 - 1,821K_T^3) \quad (59_b)$$

Para $\omega > 81,4^\circ$ e $0,3 \leq K_T \leq 0,8$.

A equação utilizada para o cálculo do ângulo de incidência θ foi considerada a equação para um coletor solar com o plano de movimentação no eixo norte sul publicada por Duffie e Beckman (2006):

$$\cos \theta = (\cos^2 \theta_z + \cos^2 \delta \times \sin^2 \omega)^{1/2} \quad (60)$$

A equação utilizada para a incidência de radiação solar direta no ângulo zenital foi a seguinte

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \times \cos \delta \times \cos \omega + \sin \varphi \times \sin \delta \quad (61)$$

Então, a taxa de radiação no plano da área de abertura do concentrador solar com a área no plano horizontal, R_b , é dada pela seguinte equação, integrando-se as equações 7 e 8 para ω .

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (62)$$

Sendo assim, a radiação solar direta incidente por área no plano da área de abertura do concentrador é dado pela multiplicação de R_b e H_b , cujos valores estão exibidos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Radiação solar direta incidente no plano da área de abertura do concentrador solar em um dia médio de cada mês.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
$H_{b, Aa}$ [MJ/m ²]	281	516	2833	547	237	231	286	409	1645	846	339	252

4.5 ENERGIA GERADA POR UM COLETOR CONCENTRADOR E SUA QUANTIDADE DE VAPOR

Os fornecedores dos coletores concentradores apresentados no capítulo 3 não expõem todos os dados técnicos de todos os componentes nos catálogos dos respectivos produtos, impossibilitando a realização de um cálculo utilizando as equações do capítulo 2. Mas alguns daqueles fornecedores citam alguns valores da eficiência do coletor em uma dada temperatura, ou até um gráfico da eficiência.

Mas o fornecedor do coletor concentrador parabólico linear PTC 1000 cita o nome da fornecedora do material utilizado no refletor, e por isso, é possível a obtenção de alguma propriedade óptica. Então, ao longo deste trabalho foram apresentados alguns cálculos com dois tipos de coletores concentradores citados no capítulo 3, e ao final, foi realizado um cálculo assumindo alguns parâmetros para o coletor concentrador PTC 1000.

Assumindo que uma determinada indústria utilize uma turbina a vapor que fornece uma potência de 300 kW. A pressão e temperatura do vapor de água na entrada desta turbina precisam ser respectivamente de 22 bar e 320 °C. E a pressão de saída é 6 bar.

Para determinar a quantidade de energia demandada pelo fluido para atingir novamente as condições de entrada na turbina. Foi considerado um ciclo isentrópico termodinâmico, e, portanto, o sistema de evaporador pelos concentradores solares deverá fornecer $Q_u = 2453$ kW a uma vazão de 1,026 kg/s de água.

As equações abaixo estão de acordo com Duffie e Beckman (2006) e são utilizadas para cálculo da estimativa da incidência de radiação solar direta no plano horizontal.

$$I_b = I \left(1 - \frac{I_d}{I} \right) \quad (63)$$

e

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0,09k_T & \text{para } k_T \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604k_T + 4,388k_T^2 - 16,638k_T^3 + 12,336k_T^4 & \text{para } 0,22 < k_T \leq 0,8 \\ 0,165 & \text{para } k_T > 0,8 \end{cases} \quad (64)$$

Portanto, a radiação no plano de abertura é:

$$I_{b,T,L-O} = R_{b,L-O} \times I_b = 1.144 \frac{J}{m^2} \quad (65)$$

Para efeito de comparações entre os concentradores, é útil padronizar, também, a vazão mássica do fluido térmico, portanto, a equação seguinte define esta vazão.

$$m = \frac{I_{b,T,L-O}}{C_p \times \Delta T + \lambda} \times \eta \quad (66)$$

Para outras considerações, admitiram-se testes no estado estacionário, temperatura ambiente de 20°C, temperatura de entrada do fluido térmico no receptor de 20°C, temperatura que o fluido deixa o receptor de 100°C e 200°C. E, finalmente, considerou-se que o eixo do sistema de rastreamento dos coletores concentradores foi orientado leste-oeste. Na sequência estes cálculos foram utilizados para comparações dos coletores concentradores dos fabricantes SOLITERM, FASOL,

4.5.1 COLETORES SOLARES CONCENTRADORES FABRICADOS POR PARASOL

O concentrador considerado, da PARASOL possui área de abertura, A_a , de 7,5 m². De acordo como fabricante, a temperatura de trabalho recomendada é entre 100 e 200°C. A eficiência com o fluido na temperatura inicial é de 58%, e considerando a temperatura final de 100°C, a eficiência fica em 55% com uma vazão mássica de 0,243 kg/m². Se o receptor for evacuado, a eficiência sobe para 58% com uma vazão mássica de 0,256 kg/m².

Para temperatura de saída do fluido térmico, do receptor, a 200°C, sem que o absorvedor esteja evacuado, a eficiência é de 51%, com a vazão mássica de 0,197 kg/m². Com o absorvedor evacuado, é de 57% com a vazão mássica de 0,216 kg/m².

4.5.2 COLETORES SOLARES CONCENTRADORES FABRICADOS POR SOLITEM

Os concentradores SOLITEM do modelo PTC 1000 possuem área de abertura, A_a , de 2 m² e são indicados, pelo fabricante SOLITEM, para aplicações em que o fluido atinja temperaturas maiores ou iguais a 200°C. A equação abaixo é disponibilizada pela SOLITEM para estimativa da eficiência do coletor a uma dada temperatura de saída do fluido.

$$\eta = \eta_0 - a_{1a} \cdot \frac{\Delta \bar{T}}{DNI} - a_{2a} \cdot \frac{\Delta \bar{T}^2}{DNI} \quad (67)$$

A eficiência com o fluido na temperatura ambiente, isto é, 25°C, é de 75%. A eficiência estimada no cálculo com o fluido saindo a 100°C do receptor do coletor concentrador PTC 1000 é de 74%, com a vazão mássica de 0,33 kg/m². E com a temperatura de saída em 200°C, a eficiência cai para 73%, com a vazão de 0,277 kg/m².

5 CONCLUSÃO

O mercado de equipamentos que convertem a energia solar em energia térmica e elétrica está em rápida expansão. E os coletores concentradores solares térmicos discutidos neste trabalho demonstraram uma variação de até 22% na eficiência dos equipamentos. Essa comparação entre eficiências foi realizada entre dois fabricantes, mas tende a ser maior se analisada de forma mais ampla.

As informações disponíveis são limitadas e não padronizadas. Há a necessidade da realização de cálculos de estimativas para que seja conhecido o potencial de cada coletor, e então, saber se é possível utilizar um o coletor concentrador de um dado fabricante para uma dada demanda de vapor ou outra forma de energia térmica.

A Tabela 5.1 compara os valores das eficiências para os coletores concentradores parabólicos lineares discutidos nesta seção. Nota-se a diferença entre o concentrador da SOLITEM e da PARASOL.

Tabela 5.1 Comparação entre as eficiências dos coletores PARASOL e SOLITEM

Fabricante	η_0	η_{100} / m [kg/m ²]	η_{200} / m [kg/m ²]
PARASOL	0,58	0,55 / 0,243	0,51 / 0,197
PARASOL vácuo	0,58	0,58 / 0,256	0,57 / 0,216
SOLITEM	0,75	0,75 / 0,33	0,73 / 0,277

A Tabela 5.2 compara os custos dos coletores concentradores por unidade de área dos fabricantes PARASOL, FASOL, HEINRICH e Solarmundo.

Tabela 5.2 Comparação de custo de coletores concentradores por unidade de área

Fabricante	Modelo	Custo por €/m ²
PARASOL	PTC 1800	150
FASOL	FASOL	150*
HEINRICH	Fresnel	200
Solarmundo	Fresnel	120 - 150

* se a área instalada for igual ou maior que 1000 m².

6 BIBLIOGRAFIA

DUFFIE, J.A; BECKMAN, W.A: **Solar engineering of Thermal Processes**. 3ª Ed. New Jersey: Wiley – John Wiley & Sons, INC. 2006.

IEA - International Energy Agency, **Medium Temperature Collectors**. IEA Solar Paces Task IV, Austria, 2005

KALOGIROU, S. A. **Parabolic trough collectors for industrial process heat in Cyprus**.

KALOGIROU, S. A. **SOLAR ENGINEERING PROCESSES AND SYSTEMS**, San Diego, California, EUA, 2009

OELHER, U.; SCHEFFLER, W. **The use of indigenous materials for solar conversion**. Solar Energy Materials and Solar Cells, 33. 1994. 379 - 387.

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S. L., RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1º ed., São José dos Campos, 2006.

RABL, A. **comparison of solar cocnentrators**. Solar Energy, v. 18, 2., 1976.

SCHEFFLER, W. **Introduction to the revolutionary design of Scheffler Reflectors**. SCIs International Solar Cooker Conference 2006, 21, Granada, Spain, 2006.

VANNONI, C.; BATTISTI, R.; DRIGO, S. **Potential for Solar Heat in Industrial Processes**. Ciemat, Madrid, 2008