

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS
ENERGÉTICAS E NUCLEARES

**COLETOR CONCENTRADOR PARABÓLICO
COMPOSTO (CPC) COM ABSORVEDOR V INVERTIDO
COMPLETAMENTE ILUMINADO**

BRÁULIO BEZERRA BRANDÃO

RECIFE – PERNAMBUCO - BRASIL

OUTUBRO - 2004

BRÁULIO BEZERRA BRANDÃO

**COLETOR CONCENTRADOR PARABÓLICO
COMPOSTO (CPC) COM ABSORVEDOR V INVERTIDO
COMPLETAMENTE ILUMINADO**

Dissertação submetida ao programa de pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares - PROTEN do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Fontes renováveis de energia.

ORIENTADOR: PROF. DR. CHIGUERU TIBA

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. NAUM FRAIDENRAICH

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL

OUTUBRO - 2004

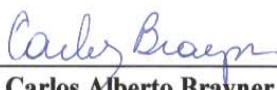
**COLETOR CONCENTRADOR PARABÓLICO
COMPOSTO (CPC) COM ABSORVEDOR V INVERTIDO
COMPLETAMENTE ILUMINADO**

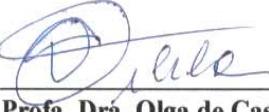
Bráulio Bezerra Brandão

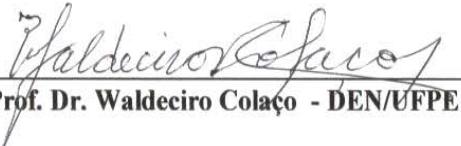
APROVADO EM: 13.10.2004

**ORIENTADOR : Prof. Dr. Chigueru Tiba
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Naum Fraidenraich**

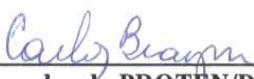
COMISSÃO EXAMINADORA:


Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira – DEN/UFPE


Prof. Dr. Olga de Castro Vilela - DEN/UFPE


Prof. Dr. Waldecir Colaço - DEN/UFPE

Visto e permitida a impressão


Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

Aos meus pais, Heloisa e Nivaldo (in memoriam), e irmãos: Fabiola, Gláucio e Liélia. Que sempre depositaram confiança e ajuda, e, mais que meus ídolos, tornaram-se protagonistas deste trabalho,

dedico.

AGRADECIMENTOS:

Ao Professor Chigueru Tiba por todas as contribuições, dedicação e estímulo as pesquisas.

Ao Professor Naum Fraidenraich pela gigantesca atuação que tornou possível a existência deste trabalho.

Ao CNPq pelo incentivo concedido através da bolsa e ao Departamento de Energia Nuclear e ao Professor Carlos Brayner, pela oportunidade concedida.

As Professoras, Olga Vilela e Elielza Barbosa pela segurança empenhada.

Ao Professor Waldeciro Colaço e ao Professor Rajendra pelas convenientes ajudas.

A minha Robertinha, pelo conforto nas adversidades e, sobretudo, compreensão com que contornou os obstáculos.

Aos Amigos da Área de testes, a Jane do administrativo do grupo FAE, a Eliete, Juarez, Norma, Edvaldo e Seu Antônio.

Aos meus colegas e amigos de sala de aula pelo apoio: Adalberto, Bione, Carlos, Flávio, Gilmário, Milton, Rinaldo, Samuel, Silvia e Tito.

A Magali e Nilvânia pela simpatia, atenção e profissionalismo que sempre apresentaram.

A tia Memem pela sua preocupação com meu trabalho.

Ao Professor, Escritor, Poeta e Amigo Amaro Matias (in memoriam), meu padrinho, que muito contribuiu para exaltar a educação do nosso País.

A todos os meus amigos de infância que nunca hesitaram em ajudar, agradeço.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XIII
RESUMO.....	XVII
ABSTRACT.....	XIX
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1 Tecnologia solar disponível ou em desenvolvimento	6
2.2 Principais estudos teóricos e experimentais sobre os CPC.....	12
2.3 Concentradores CPC de Baixa Relação de Concentração.....	16
2.4 Antecedentes bibliográficos mais relevantes no estudo dos CPC de baixa relação de concentração.....	21
3 METODOLOGIA.....	22
3.1 Fundamentos teóricos.....	22
3.1.1 Equação da parábola na forma polar.....	23
3.2 Involuta – Generalização do princípio dos raios extremos para absorvedor não plano.....	24
3.3 Cavidade concentradora.....	25
3.3.1 Propriedades geométricas.....	25
3.3.2 Princípios de construção da cavidade refletora.....	27
3.4 Propriedades óticas.....	29
3.5 Energia térmica mensal e anual coletada pelo CPC.....	30

3.5.1 Cálculo da energia térmica média mensal e anual produzida pelo coletor.....	31
3.5.2 Radiação solar aceita por um coletor CPC.....	33
3.5.3 Ângulos de incidência solar para coletores CPC.....	34
3.5.3.1 Função de aceitação angular.....	34
3.5.3.2 Ângulo de incidência projetado transversalmente e longitudinalmente à cavidade CPC.....	36
3.5.3.3 Variação sazonal do ângulo de incidência transversal.....	38
3.5.4 Coeficiente de perdas térmicas do coletor.....	39
3.5.4.1 Temperatura ambiente do dia médio mensal.....	39
3.5.4.2 Cálculo da radiação solar horária no plano do coletor.....	39
3.6 Fundamentos computacionais.....	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1 Equações da curva refletora e do número médio de reflexões de um CPC.....	43
4.2 Propriedades geométricas e óticas dos CPC ideais.....	47
4.3 Otimização do comprimento da superfície refletora em função do ângulo de vértice do absorvedor.....	52
4.4 Otimização da energia solar térmica anual gerada.....	54
4.4.1 Energia solar térmica gerada em base anual.....	55
4.4.2 Relação entre a energia solar térmica anual gerada por um CPC e um coletor plano.....	62
4.4.3 Efeito da refletividade da superfície refletora na relação entre a energia solar térmica anual gerada pelo CPC e coletor plano.....	66
5 CONCLUSÕES.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Consumo setorial de energia para os EUA.....	02
2 Porcentual acumulado do calor de processo industrial utilizado nos EUA em função da temperatura do processo	03
3 Coletor plano.....	07
4 Corte esquemático de um coletor solar plano.....	08
5 Corte esquemático de um coletor concentrador parabólico composto.....	09
6 Tipos de coletores comerciais: a) placas planas, b) CPC e c) tubo evacuado.....	10
7 Curvas características da eficiência dos coletores plano, CPC de baixa concentração e coletor de tubo evacuado, SRCC (2004).....	11
8 CPC com absorvedores distintos: a) plano horizontal, b) plano vertical, c) formato V invertido e d) cíndrico.....	13
9 Delimitação das áreas de um CPC: A_c - área de cobertura, A_a – área do absorvedor e A_r – área do refletor.....	13
10 Truncamento de um CPC.....	18
11 CPC com absorvedor plano horizontal.....	19
12 Representação de um CPC com absorvedor V invertido.....	20
13 Corte frontal do CPC fabricado pela empresa AO SOL.....	20
14 Princípio dos raios extremos.....	22
15 Construção do perfil do refletor do CPC mediante a aplicação do princípio dos raios extremos.....	23
16 Elementos de uma parábola genérica.....	24
17 Generalização do princípio dos raios extremos para absorvedor não-plano.....	25

18	Parâmetros geométricos da cavidade do CPC com absorvedor V invertido completamente iluminado nas condições truncada (esquerda) e nominal (direita).....	26
19	Definição da construção da cavidade dos CPC.....	27
20	Concentrador CPC com absorvedor V invertido, completamente iluminado com ângulo de aceitação θ_a e ângulo de vértice do absorvedor igual a γ	28
21	Representação do balanço de energia em um CPC.....	32
22	Função aceitação angular para CPC truncados.....	36
23	Definição do sistema de referência de um coletor CPC.....	37
24	Variação sazonal do ângulo de incidência transversal de um CPC.....	39
25	Fluxograma do código para cálculo das propriedades óticas e geométricas da cavidade dos CPC.....	42
26	Resumo do fluxograma de geração da energia térmica anual pelo CPC.....	43
27	Cavidade de um CPC:limites das diversas secções do refletor.....	44
28	Cavidade de um CPC com ângulo de aceitação de $45,58^0$, concentração nominal igual a 1,4 e ângulo de vértice do absorvedor igual a 78^0	48
29	Desenho 3D de um CPC com absorvedor V invertido, completamente iluminado, sem truncamento e ângulo de aceitação de $45,58^0$ com ângulo de vértice do absorvedor igual a 78^0	49
30	Relação entre o comprimento da superfície refletora e a abertura, em função da relação de concentração	50
31	Relação entre a altura do CPC e a abertura, em função da relação de concentração.....	51
32	Número médio de reflexões de um CPC em função da relação de concentração	52
33	Configuração da cavidade de um CPC com a escolha ótima do ângulo de vértice do absorvedor $\gamma = \theta_a$	55
34	Número médio de reflexões para diversos CPC ($\gamma = \theta_a$) com variados graus de truncamento.....	58

35 Relação entre o comprimento da superfície refletora e abertura para diversos CPC ($\gamma = \theta_a$) com variados graus de truncamento.....	59
36 Energia solar térmica gerada anualmente pelos diversos CPC com variados graus de truncamento e temperatura de operação 50° C.....	61
37 Relação entre a energia térmica anual gerada por um CPC e por um coletor plano para o Recife com temperatura de operação igual a 50° C.....	64
38 Relação entre a energia térmica anual gerada pelo CPC e pelo coletor plano para o Recife com temperatura de operação igual a 80° C.....	66
39 Efeito da refletividade na relação entre a energia térmica anual gerada por um CPC e um coletor plano. CPC de relação de concentração 1,2 e temperatura de operação de 80° C.....	68

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Resumo bibliográfico do que foi feito e das lacunas existentes no estudo dos CPC com baixa relação de concentração.....	21
Tabela 2 - Otimização do comprimento da superfície refletora em função do ângulo de vértice do absorvedor.....	54
Tabela 3 - Temperaturas ambiente médias mensais: valores mínimos, médios e máximos para a cidade de Recife.....	57
Tabela 4 - Relação entre energia térmica anual gerada pelo CPC truncado e não truncado, para ângulo de aceitação de 30 ° (concentração nominal 2) e temperatura do fluido de 50° C.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A_a	Área do absorvedor
Abs	Absorvedor
A_c	Área de cobertura do coletor
A_r	Área da superfície refletora
C	Relação de concentração da cavidade
C_n	Concentração nominal
CPC	Concentrador parabólico composto
ds	Elemento de curva
e_1	Eixo de simetria da primeira parábola
e_2	Eixo de simetria da segunda parábola
e_3	Eixo de simetria da terceira parábola
E_d	Fração de energia emitida por uma superfície refletora ideal
f	Distância focal da parábola
F	Função aceitação angular do CPC
F_1	Foco da secção parabólica 1
F_2	Foco da secção parabólica 2
F_3	Foco da secção parabólica 3
F_R	Fator de remoção de calor
F_S	Função aceitação angular do CPC na região angular maior que θ_a
H	Altura da cavidade não truncada

H_t	Altura da cavidade truncada
I	Irradiação solar horária
I_b^n	Irradiação solar direta horária normal
I_b^c	Irradiação solar direta horária no plano do coletor
I_d^c	Irradiação solar horária difusa aceita por um coletor CPC
$\hat{\ell}$	Direção longitudinal do CPC
I_d^h	Irradiação solar horária difusa no plano horizontal
I_t	Irradiação solar total horária aceita pelo CPC
\bar{K}	Valor médio do modificador de ângulo de incidência
K	Modificador de ângulo de incidência
L	Comprimento da superfície refletora
L_t	Comprimento da superfície refletora truncada
L_i	Comprimento da superfície refletora da secção parabólica i
$L(\gamma)$	Comprimento da superfície refletora para CPC com absorvedor V invertido com semi- ângulo de vértice γ
$L(\gamma=\pi/2)$	Comprimento da superfície refletora para CPC com absorvedor V invertido com semi- ângulo de vértice igual a $\pi/2$
$\langle n \rangle$	Número médio de reflexões
\hat{n}_c	Direção normal à abertura do CPC
q_T	Energia térmica diária gerada

Q_T^a	Energia térmica anual gerada
Q_T^m	Energia térmica mensal gerada
r	Comprimento da base do absorvedor V invertido, raio vetor
\hat{s}_c	Direção transversal do CPC
t_i	Instante inicial (diário) de geração térmica pelo CPC
t_f	Instante final (diário) de geração térmica pelo CPC
T_{amb}	Temperatura ambiente
T_{max}	Temperatura ambiente máxima média
T_{med}	Temperatura ambiente média
T_{min}	Temperatura ambiente mínima média
T_e	Temperatura do fluido na entrada do coletor
U	Coeficiente de perdas térmicas do coletor CPC
V_1	Vértice da primeira parábola
V_2	Vértice da segunda parábola
V_3	Vértice da terceira parábola
X	Semi-abertura da cavidade concentradora
X_t	Semi-abertura da cavidade concentradora truncada
x	Coordenada cartesiana
y	Coordenada cartesiana
α	Absortância do absorvedor
β	Ângulo de inclinação do coletor em relação a horizontal local
γ	Semi-ângulo de vértice do absorvedor V invertido
δ	Declinação solar

η	Eficiência ótica
λ	Latitude
θ_a	Ângulo de aceitação do concentrador CPC
θ_i	Ângulo de incidência do raio do sol
θ_t	Ângulo de truncamento do CPC
θ'	Ângulo entre o raio incidente e a normal a superfície refletora neste ponto
$\theta_{//}$	Ângulo de incidência longitudinal do CPC
θ_{\perp}	Ângulo de incidência solar transversal do CPC
ρ	Coeficiente de refletividade da superfície refletora
τ	Transmitância do vidro
ϕ	Ângulo polar
Δs	Diferença de comprimento
ΔT	Diferença de temperatura
ω	Ângulo horário

**COLETOR CONCENTRADOR PARABÓLICO
COMPOSTO (CPC) COM ABSORVEDOR V INVERTIDO
COMPLETAMENTE ILUMINADO**

Autor: Bráulio Bezerra Brandão

Orientador: Prof. Dr. CHIGUERU TIBA.
Coorientador: Prof. Dr. NAUM FRAIDENRAICH

RESUMO

A literatura existente sobre coletores concentradores parabólicos compostos (CPC) é numericamente considerável, entretanto isto não ocorre com as publicações a respeito dos CPC com absorvedor V invertido completamente iluminado, no que se refere às propriedades óticas, geométricas e energia térmica gerada. Este tipo de concentrador solar existe no mercado internacional, porém não se tem conhecimento das divulgações dessas propriedades, talvez por motivo de proteção industrial. No presente trabalho são deduzidas as equações que definem a curva da cavidade concentradora e suas propriedades óticas e geométricas são estudadas em detalhe, por um programa de simulação numérica elaborado em linguagem MATLAB. Adicionalmente, foram feitos estudos de otimização sobre a viabilidade da construção deste coletor, os quais relacionam os efeitos do truncamento (eliminação da parte superior da cavidade) com as propriedades geométricas, óticas e a energia anual gerada

pelo equipamento. Para CPC com absorvedor V invertido completamente iluminado e ideal (sem truncamento) conclui-se que, na configuração em que o seu ângulo de aceitação é igual ao ângulo do vértice do absorvedor, ocorre um mínimo no perímetro da cavidade refletora quando se consideram a concentração nominal e o tamanho do absorvedor constantes. Em relação aos coletores CPC com absorvedor V invertido, completamente iluminado e com truncamento, a otimização mostrou que para um concentrador com relação de concentração 1,2, como exemplo, as relações ótimas de comprimento da superfície refletora e abertura, número médio de reflexões e energia térmica gerada ocorrem para concentradores oriundos de ângulos de aceitação variando de 33,75 a 45,58 graus.

**COLETOR CONCENTRADOR PARABÓLICO
COMPOSTO (CPC) COM ABSORVEDOR V INVERTIDO
COMPLETAMENTE ILUMINADO**

Author: Bráulio Bezerra Brandão

Adviser: Prof. Dr. CHIGUERU TIBA.

Co-adviser: Prof. Dr. NUM FRAIDENRAICH

ABSTRACT

Although literature on parabolic solar concentrators is numerically considerable, there are no publications regarding CPC with fully illuminated, inverted V absorber, nothing is mentioned about optical and geometric properties or, collected thermal energy. This type of solar concentrator exists in the international market, but with little known divulgence of its properties, perhaps explained because of industrial protection. In the first part of this work, the equations that define the concentrator cavity curve and its optical and geometric properties were deduced and studied in detail, by a numeric simulation program, elaborated in MATLAB language. Additionally, optimization studies about the viability of the construction of this collector were carried out, relative truncation effects (the elimination of the upper part of the cavity) on the

optics and geometric properties and the annual energy generated by the equipment.

For the CPC concentrator collectors with fully illuminated inverted V absorbers and ideal (without truncation) it was concluded that in the configuration in which the angle of angular acceptance of the CPC is equal to the apex angle of the absorber, there occurs a minimum perimeter of the reflector cavity, when the nominal concentration and the size of the absorber are constant. Regarding the CPC concentrator collectors fully illuminated with inverted V absorber and with optimized truncation, it is shown, for a concentrator of 1.2 concentration, a good related reflector surface length and opening, and a mean number of reflections and generated thermal energy that this occurs for concentrators arising from concentrators with acceptance angles among 33.75 up to 45.58 degrees.

1 INTRODUÇÃO

O Sol despeja na superfície da terra, em uma hora, uma quantidade de energia que é aproximadamente igual à produção anual de todos os sistemas de geração de energia. Essa energia chega ao topo da atmosfera com uma taxa constante de aproximadamente 1367 W/m^2 , é atenuada pela atmosfera e, em dias claros, ao meio dia solar, chega à superfície terrestre com intensidade de 1000 W/m^2 .

A utilização da energia solar térmica veio com o início da civilização que utilizava a radiação como fonte energética em diversas aplicações como, por exemplo, o aquecimento passivo de moradias (orientação da residência na direção norte ou sul) e secagem de roupas e alimentos. Entretanto, a aplicação de forma sistemática é muito mais recente e acontece na primeira metade do século XX para aquecimento de água residencial. A partir daí, com alguns ciclos de declínio e ressurgimento, firma-se na última década do século XX. A conversão da energia solar em eletricidade inicia-se na segunda metade do século XX, para fins espaciais, e hoje em dia é a tecnologia consagrada para esse fim.

A utilização de energia no setor industrial e comercial de países desenvolvidos ou em desenvolvimento constitui uma parcela substancial do consumo

global de energia. Na Figura 1 pode ser vista a estrutura do consumo setorial de energia nos EUA onde, 54% da energia consumida deve-se ao setor industrial e comercial. Aproximadamente, 45% do consumo do setor industrial, o equivalente a 18% do consumo total de energia, envolve diretamente energia térmica (KUTSCHER et al., 1982).

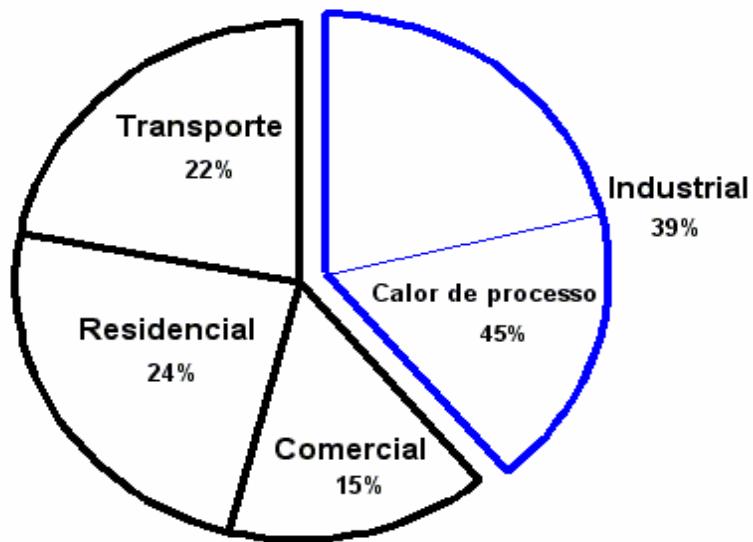


Figura 1 – Consumo setorial de energia para os EUA

A Figura 2 mostra a dependência da temperatura da energia utilizada pelo setor industrial dos EUA, expressa como porcentual acumulado (KREIDER, 1979). Também pode ser visto na mesma figura que cerca de 30% do calor de processo industrial ocorre à temperatura menor que 100 °C e 50% abaixo de 240 °C.

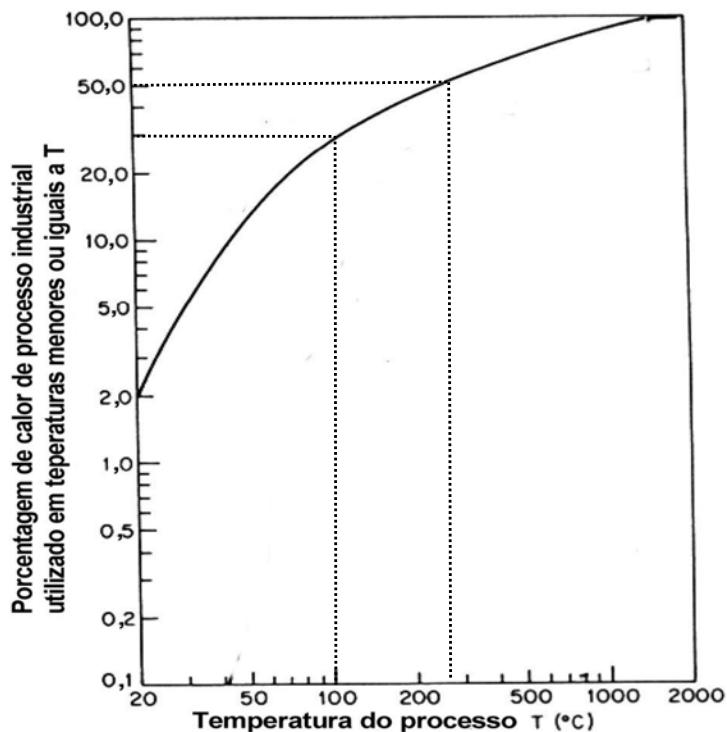


Figura 2 - Porcentual acumulado do calor de processo industrial utilizado nos EUA em função da temperatura de processo

Em relação ao Brasil, uma análise realizada pelo Grupo de Fontes Alternativas de Energia da Universidade Federal de Pernambuco (FAE), mostra que em torno de 37,5% do consumo total de energia na indústria brasileira foi (ano base 1983) utilizado para calor de processo industrial e que a participação setorial da indústria no consumo de energia no Brasil, nesse período, era de 39,1% (FRAIDENRAICH et al., 1986) o que mostra a grande semelhança na estrutura de consumo industrial de energia do Brasil com os EUA.

Em sua grande parte, esse calor de processo industrial é suprido por combustíveis fósseis. A sua substituição pelo calor proveniente da energia solar é conveniente e atrativa entre outros, pelos seguintes motivos:

- A energia solar é ambientalmente pouco agressiva;
- Não produz efeito estufa;
- Conserva os insumos fósseis para aplicação na fabricação de produtos mais elaborados, como a produção de fármacos e química fina;
- Já existe tecnologia relativamente simples para fabricação de coletores solares que atinjam temperaturas até 240°C;
- Finalmente, mas não menos importante, a tecnologia solar gera mais empregos por unidade de energia gerada em relação a outras tecnologias (FRAIDENRAICH et al., 1986).

O presente estudo faz parte do esforço para o desenvolvimento de equipamentos de energia solar com as características e os propósitos descritos acima.

O CPC com absorvedor V invertido completamente iluminado foi o escolhido, pois este apresentou todas as características que suprem a necessidade de produção de calor para processo industrial exigida, dentro da referida faixa de temperatura. Pelas razões que antecedem, serão propostos como objetivo do presente trabalho o seguinte:

- Deduzir as propriedades geométricas e óticas da cavidade de um coletor tipo CPC de baixa relação de concentração ($C < 2$) com absorvedor V invertido, completamente iluminado;
- Estudar detalhadamente as propriedades geométricas, óticas e energia mensal gerada por esse tipo de coletor solar;
- Adicionalmente, realizar a otimização de dois de seus principais parâmetros: a energia térmica anual gerada e a superfície da cavidade no que concerne ao ângulo de vértice do absorvedor e truncamento da cavidade refletora.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Tecnologia solar disponível ou em desenvolvimento

A tecnologia heliotérmica (conversão da radiação solar em energia térmica) já conta com equipamentos comercializáveis, ou em fase de desenvolvimento muito próximo de se tornarem comercializados, para suprir a demanda de calor de processos industriais na faixa de até 240°C.

Existem dois tipos de equipamentos solares térmicos: coletores planos e concentradores. No primeiro caso há ainda uma subdivisão em coletor plano convencional e coletor plano com tubos evacuados. No último, a energia solar é concentrada opticamente antes de ser transformada em energia térmica. A utilização de um desses está diretamente ligada às características de aplicação do projeto, como temperatura de trabalho e viabilidade econômica da energia produzida.

A Figura 3 mostra o esquema de um coletor plano convencional cujos constituintes básicos são:

- 1) Caixa do coletor: caixa “metálica” ou “plástica” que envolve as diversas partes e as protege de fatores externos;

- 2) Isolamento térmico: material isolante térmico que preenche a parte inferior e os lados do coletor para minimizar as perdas térmicas;
- 3) Absorvedor: Placa de cobre coberta com tinta ou superfície seletiva e com tubos onde passa um fluido para remoção de calor e transferência para o local de sua utilização;
- 4) Cobertura: Área de recepção dos raios solares, composta por uma superfície transparente constituída por uma ou mais placas de vidro ou outro material transparente à radiação na região visível. Tem a função de reduzir perdas térmicas convectivas, além de conter a radiação infravermelha e servir como parte (transparente) da caixa de proteção anteriormente descrita.

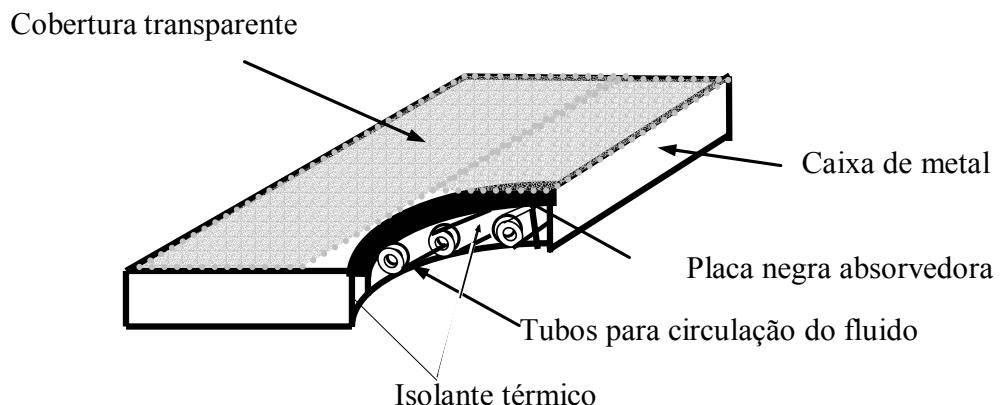


Figura 3 - Coletor plano

Em um coletor plano a superfície do absorvedor é igual à superfície da cobertura de vidro, conforme pode ser visto na Figura 4.

Como as perdas térmicas são proporcionais à área do absorvedor, este tipo de dispositivo tem um limiar de temperatura de operação relativamente baixo, ou seja, cerca de 40°C acima da temperatura ambiente.

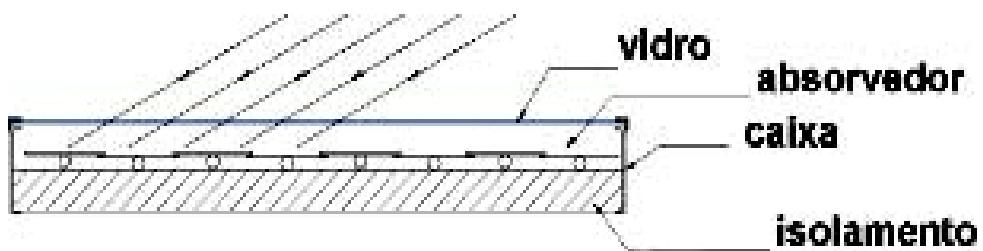


Figura 4 – Corte esquemático de um coletor solar plano

Para processos ou demandas que exigem temperaturas mais elevadas, duas tecnologias podem ser utilizadas: a) Coletor plano com tubos evacuados: consiste de tubos aletados recobertos com superfície seletiva e inseridos dentro de um tubo oco de vidro sob vácuo, o que permite suprimir uma boa parte das perdas de natureza convectivas; b) Coletor concentrador: basicamente trata-se de reduzir a área do absorvedor (proporcional às perdas térmicas) direcionando a radiação solar da cobertura mediante o uso de um guia de luz apropriado.

Uma alternativa para a redução de perdas de calor para coletores de placas planas, geralmente para aplicações que requerem fluidos em elevadas temperaturas, tipicamente numa faixa de temperaturas que varia entre os 80°C e 150°C, é a utilização de coletores evacuados (Figura 6). No processo construtivo, o ar entre o tubo de vidro e o absorvedor é retirado, criando vácuo. Eliminam-se assim as perdas por

convecção e condução. Poderão existir perdas por radiação, pois a energia calorífica será transferida de uma superfície quente para uma superfície fria, mesmo com vácuo, porém podem ser mitigadas mediante o uso de superfícies seletivas. Sendo assim, a tecnologia envolvida neste concentrador é bem mais sofisticada, necessitando de ferramentas especiais para sua construção e tornando seu custo muito oneroso e fora da realidade do Brasil.

O CPC tem características apropriadas (seguimento discreto em direção ao sol ou estacionário e tecnologia construtiva similar ao coletor plano convencional) para a faixa de temperatura de até 240°C que vem sendo considerada (Figura 5). Este coletor concentra a radiação solar de uma forma ideal máxima (θ_a é o ângulo de aceitação da radiação pelo CPC) de acordo com os limites permitidos pela 2º Lei da Termodinâmica (WELFORD; WINSTON, 1978; RABL, 1976). Para um concentrador bidimensional, a concentração nominal é expressa por:

$$C_n = \frac{1}{\operatorname{sen}(\theta_a)} \quad (1)$$

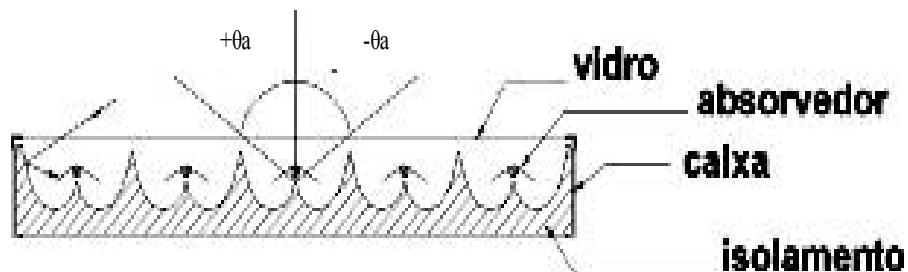


Figura 5 – Corte esquemático de um coletor concentrador parabólico composto

No CPC, mostrado na Figura 5 o absorvedor é iluminado em ambas as faces, o que torna toda a sua superfície útil para a absorção, ao contrário do absorvedor do coletor plano que é iluminado somente em uma face. O ângulo θ_a é denominado ângulo de aceitação e compreende o ângulo que define o intervalo angular incidente aceito pelo coletor.

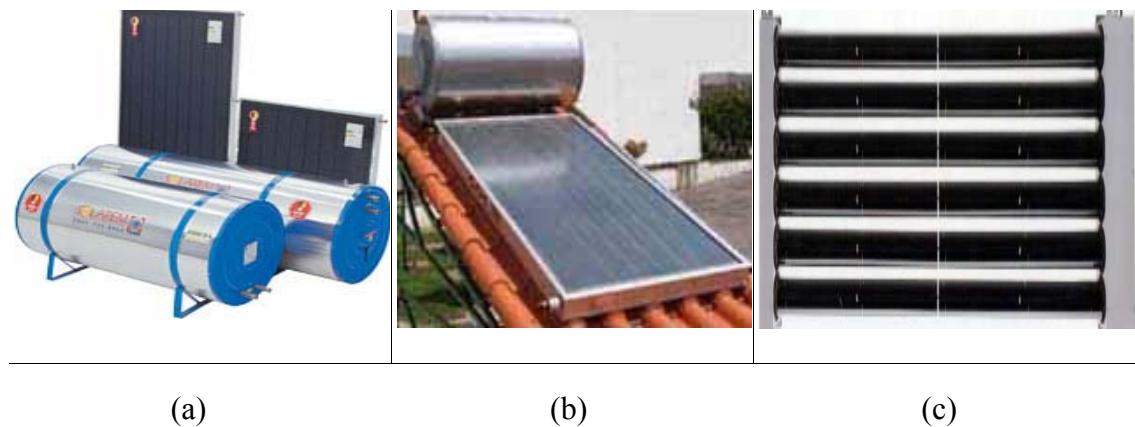


Figura 6 –Tipos de coletores comerciais: a) placas planas, b) CPC e c) tubo evacuado.

A Figura 7 mostra as curvas características das eficiências instantâneas típicas determinadas para um coletor de placas planas com uma cobertura, um CPC de baixa relação de concentração e um coletor plano com tubo evacuado. A variação da eficiência dos coletores, η é mostrada na ordenada e na abscissa o parâmetro $\Delta T / I$; o ΔT indica a diferença entre a temperatura do fluido na entrada do coletor (T_e) e a temperatura ambiente (T_{amb}) e (I) a irradiação solar incidente no plano do coletor. Pode-se observar que a partir de $\Delta T / I = 0,02$, o coletor CPC apresenta uma eficiência

superior aos coletores de placas planas. Entretanto, o coletor de tubo evacuado apresenta desempenho térmico superior ao CPC a partir de $\Delta T / I = 0,14$.

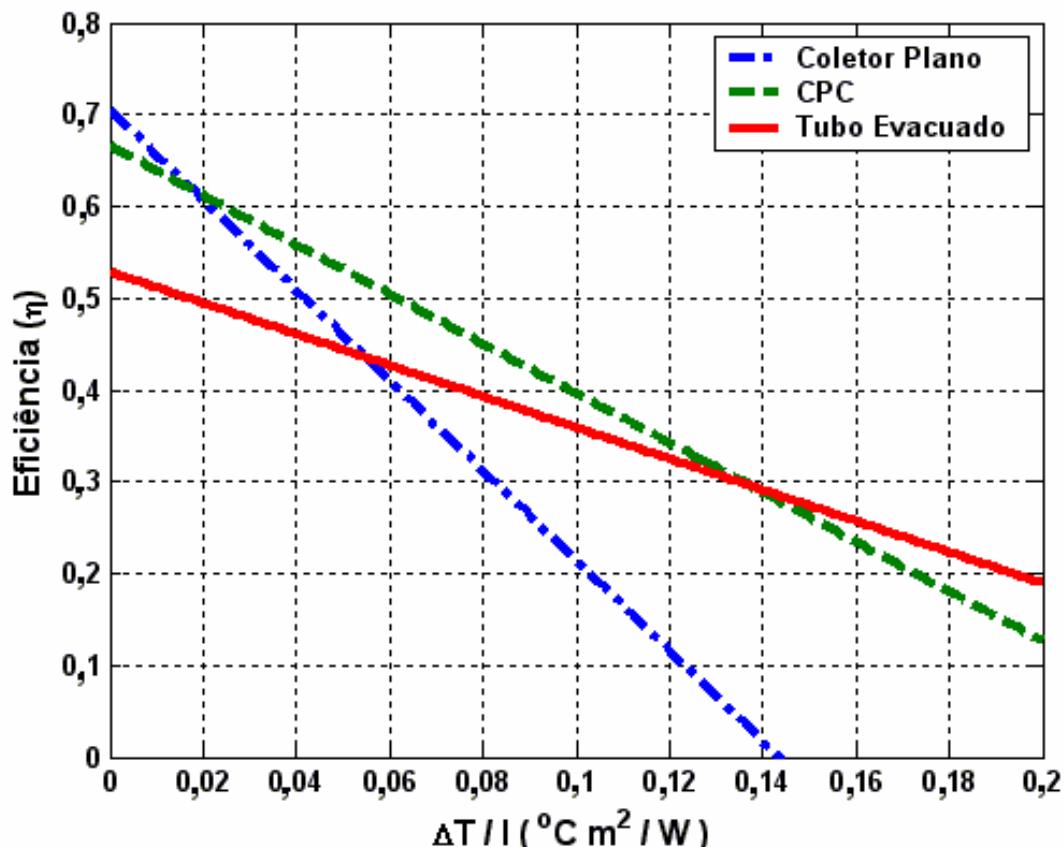


Figura 7 - Curvas características da eficiência dos coletores plano, CPC de baixa relação de concentração e coletor de tubo evacuado, SRCC (2004)¹.

Os coletores concentradores do tipo CPC de baixa relação de concentração poderão ser alternativas viáveis para as circunstâncias mencionadas anteriormente pelas seguintes razões:

¹ SOLAR RATING AND CERTIFICATION CORPORATION/FSEC; Directory of certified solar collector rating, Florida: 126p, 2004.

- São estacionários, tais como os coletores planos;
- Apresentam tecnologia construtiva intermediária entre o coletor plano e o de tubo evacuado;
- Mostram competitividade em relação aos coletores planos nas regiões de maiores temperaturas operacionais.

2.2 Principais estudos teóricos e experimentais sobre os CPC

Os CPC foram descobertos em forma independente e quase que simultaneamente, nos Estados Unidos (HINTERBERG; WINSTON, 1966) e na antiga URSS (BARANOV; MELNIKOV, 1966).

O coletor solar tipo CPC pode apresentar absorvedores planos horizontais ou verticais, no formato V invertido ou cilíndrico, como mostra a Figura 8. Adicionalmente os absorvedores podem estar em ambiente evacuado ou não. Para cada tipo de absorvedor existe uma forma geométrica ideal da cavidade, como será considerado adiante.

A área de abertura de todos os coletores CPC está situada no plano de entrada que intercepta a radiação incidente; ela é conhecida também como área de cobertura (A_c). A área absorvedora (A_a) é a área receptora onde os raios solares incidirão após serem guiados pela cavidade, nos absorvedores cilíndricos corresponde ao perímetro do círculo. A área refletora (A_r) corresponde à área das paredes da cavidade. (Figura 9).

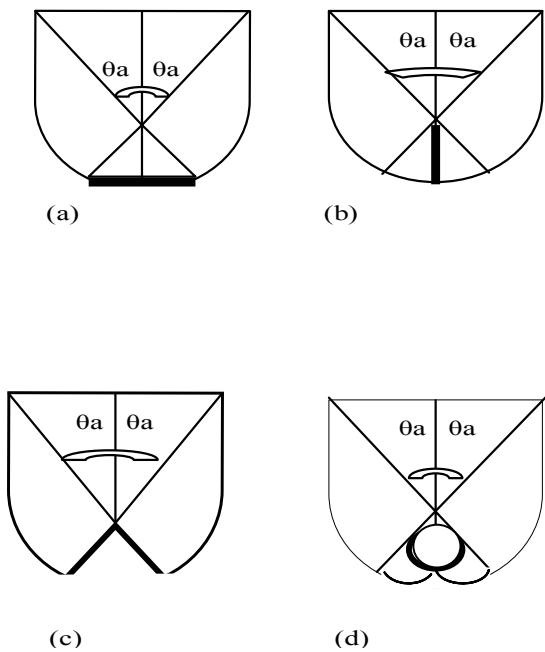


Figura 8 – CPC com absorvedores distintos: a) plano horizontal , b) plano vertical, c) formato V invertido e d) cilíndrico.

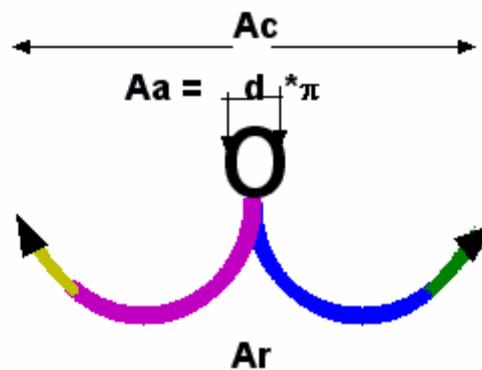


Figura 9 – Delimitação das áreas de um CPC: A_c - área de cobertura, A_a – área do absorvedor e A_r – área refletora.

A razão entre a área de cobertura, (A_c) e a área do absorvedor, (A_a) é denominada relação de concentração (C), apresentada a seguir:

$$C = \frac{A_c}{A_a} \quad (2)$$

O CPC é um dispositivo não formador de imagem que concentra a radiação solar de forma ideal (máxima), segundo a eq. (1). O concentrador tipo CPC, de baixa relação de concentração, apresenta as seguintes características (RABL, 1976a; 1979; 1980; 1985):

- a) Aceita plenamente a radiação contida dentro do intervalo angular igual a $2\theta_a$;
- b) Aceita, além da radiação solar direta, uma fração igual a $1/C$ da radiação difusa;
- c) Para concentrações menores que 10X, o ângulo de aceitação ainda é suficientemente grande, de maneira que o dispositivo requer somente movimentos discretos de acompanhamento do Sol durante o ano;
- d) Para concentrações entre 1 e 2 pode ser completamente estacionário;
- e) Apresenta boa tolerância às imperfeições óticas, sejam essas de natureza construtiva da cavidade refletora, de desvio de montagem ou de alinhamento da cavidade.

Em toda a literatura que abrange esses coletores, existem centenas de trabalhos relevantes. WINSTON (1995) já relacionava cerca de 95 artigos selecionados no que tange à análise geométrica, térmica e ótica dos coletores parabólicos com absorvedores planos e cilíndricos e concentração nominal intermediária entre 3 e 10X.

Os artigos citados abaixo são os mais representativos e que geraram os grandes marcos da evolução do CPC.

O trabalho de maior importância, pelo pioneirismo e abrangência sobre as propriedades geométricas, óticas e térmicas dos CPC para absorvedor plano foi realizado por RABL (1976). Em 1979 e 1980 o autor publicou mais dois trabalhos que completam a discussão teórica e experimental sobre coletores CPC iniciada anteriormente. Os trabalhos de RABL resultaram em muitos outros estudos décadas após sua publicação.

HSIEH (1981) analisou e modelou com detalhes o comportamento térmico dos coletores CPC com absorvedor constituído por tubos evacuados. Esse autor foi o primeiro a desenvolver uma formulação matemática detalhada para avaliação desses equipamentos. O concentrador proposto consistiu em um CPC cujo absorvedor é formado por dois tubos evacuados que servem como absorvedores de calor: *receiver jacket*. O calor é transferido para um determinado fluido operante, dentro de um tubo em “U”, pelo fluxo do calor interno na câmara entre os tubos. Quatro equações não lineares foram derivadas para prever a troca de calor entre os vários componentes do sistema. Essas equações foram subsequentemente usadas em um programa de computador para avaliar o desempenho dos coletores sob várias condições de operação. Assim, este trabalho também apresentou os cálculos das perdas térmicas, avaliou o efeito da temperatura ambiente na temperatura do coletor e discutiu também os

resultados decorrentes da linearização das equações que modelam termicamente o coletor.

EAMES; NORTON (1993) realizaram um trabalho de modelagem com diferentes configurações do CPC evacuados ou não. O estudo considera o comportamento térmico e óptico em uma análise de duas dimensões, detalhada pelo *Método dos Elementos Finitos*.

No Brasil, o Grupo (FAE), dedicou considerável esforço ao desenvolvimento de um protótipo comercial de um CPC com absorvedor cilíndrico com concentração nominal 3X (FRAIDENRAICH et al., 1984, 1986a, 1986b, 1998; TIBA et al., 1989; BARBOSA et al., 1985, 1988a, 1988b, 1993; SILVA, 1994). O resultado final desse trabalho foi o projeto construtivo detalhado do módulo coletor CPC e sua adequação ao desenho industrial e à elaboração de uma metodologia computacional para previsão do seu desempenho.

2.3 Concentradores CPC de Baixa Relação de Concentração

Estudos realizados por GORDON (1986a) exploraram as possibilidades dos concentradores CPC de baixa relação de concentração ($C = 1,0-2,0$), com absorvedor cilíndrico. Os resultados mostram que essa geometria é competitiva, ou até superior à dos coletores de placas planas. Comparados a esses últimos, muitos dos CPC

construídos na década de 80, com concentração nominal intermediária entre 2 a 10X, tinham:

- a) Menor eficiência ótica (devido principalmente ao aumento das perdas refletivas);
- b) Menor energia anual coletada (devido à restrição do ângulo de aceitação);
- c) Baixas perdas térmicas

Para aplicações em baixas temperaturas, um coletor plano com uma cobertura simples entregaria mais energia útil, anualmente, que um CPC de absorvedor evacuado com $C \geq 1,5$. Portanto, apesar da possibilidade de sua utilização para baixas temperaturas, os CPC eram comprovadamente mais caros que os coletores de placas planas, ou seja, o custo unitário da energia térmica gerada pelos CPC era mais alto.

Um dos elementos que oneravam esses CPC, em relação aos outros coletores, é que eles possuíam uma grande área de superfície refletora para guiar a luz ao absorvedor e, portanto, havia o consequente incremento no custo de materiais. Então, uma solução que sempre foi considerada, desde o início da descoberta e fabricação do CPC, era a de truncar drasticamente (seccionar) a seção refletiva superior (Figura 10) - embora pudesse ocorrer uma diminuição da taxa de concentração - e com isso, produzir uma significativa economia de material utilizado no refletor. Por outro lado, o coletor truncado tem aceitação aumentada da radiação direta (incidência maior no absorvedor) e da radiação difusa (um concentrador aceita também $1/C$ da radiação difusa) assim

como uma eficiência ótica maior devido à redução do número médio de reflexões da radiação solar antes de atingir o absorvedor. Para aplicações a baixas temperaturas, o truncamento pode ser otimizado no sentido de permitir mais ganho óptico que sacrifícios em perdas térmicas e, certamente, economia de material utilizado. Trata-se, essencialmente, de um estudo da relação custo/ benefício.

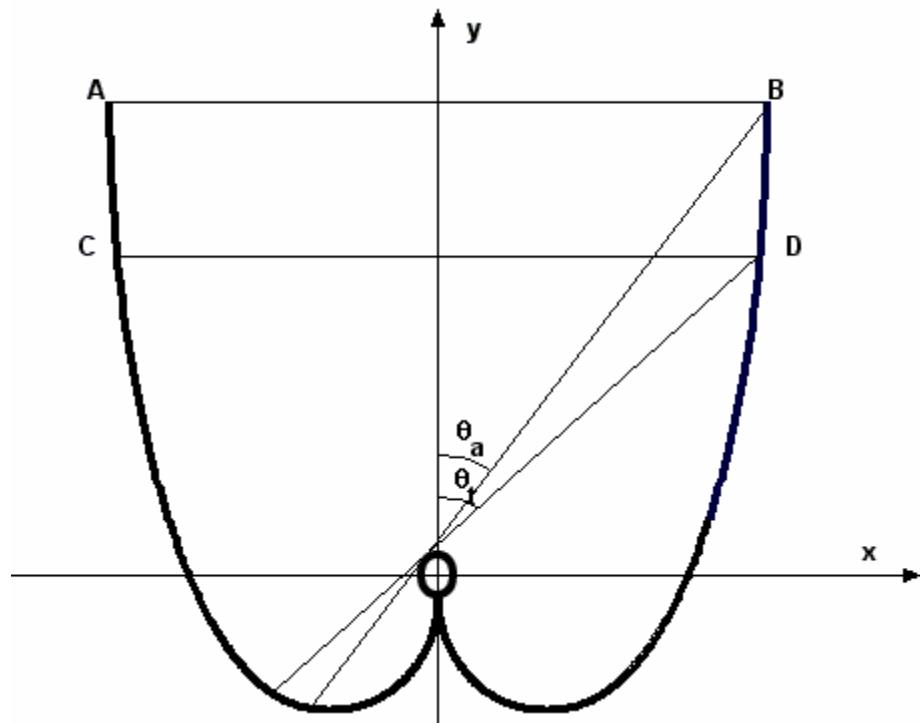


Figura 10 – Truncamento de um CPC

Esses estudos realizados em CPC com absorvedor cilíndrico de baixa relação de concentração indicavam que valores otimizados de concentração nominal (C_n) poderiam ser da ordem de 1 a 1,5X.

Em outro estudo, GORDON (1986b) mostrou que os CPC com absorvedores planos vertical ou horizontal de baixa concentração nominal (1 a 1,7X) são alternativas possíveis aos coletores solares planos convencionais (Figura 11).

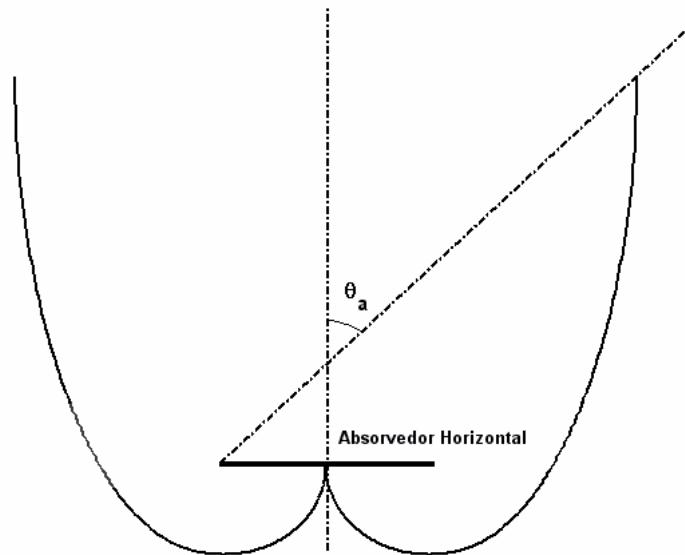


Figura 11 – CPC com absorvedor plano horizontal

BAUM; GORDON (1985), desenvolveram um concentrador geométrico 2-D, de baixa concentração nominal (1-2X) chamado CPW (*Compound Parabolic Wedge*), com absorvedor V invertido com ângulo de vértice 2γ (Figura 12). O coletor solar CPW estacionário mostrou uma significativa economia, na área da superfície refletora, em relação à configuração do CPC com absorvedor plano horizontal.

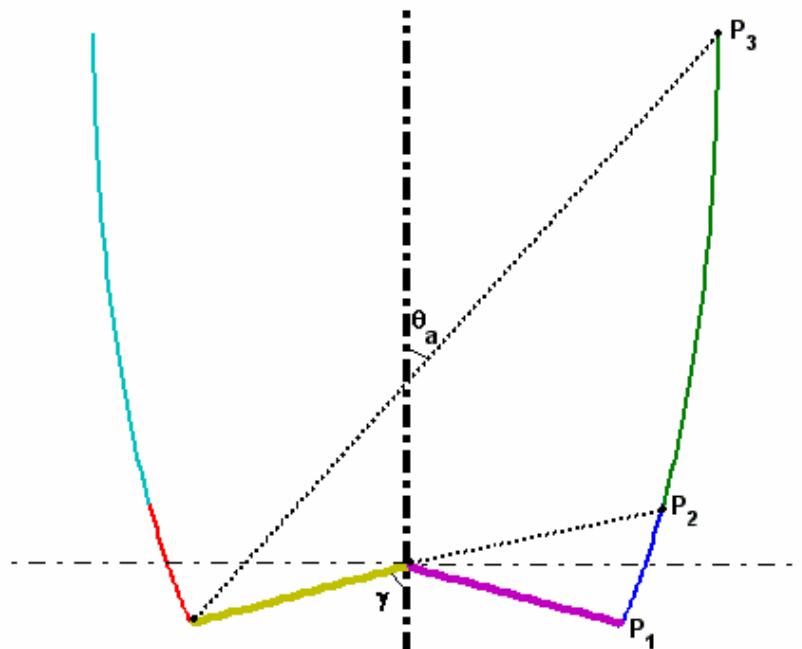


Figura 12 – Representação de um CPC com absorvedor V invertido

O CPC de baixa relação de concentração com absorvedor V invertido completamente iluminado está muito pouco estudado, principalmente com relação às características geométricas, óticas, térmicas e econômicas que apresenta. A Figura 13 mostra um coletor deste tipo fabricado e comercializado internacionalmente (AO SOL, 2003). Não é do conhecimento dos autores publicações a seu respeito, particularmente no que concerne às suas propriedades geométricas, óticas e energia térmica mensal ou anual gerada.

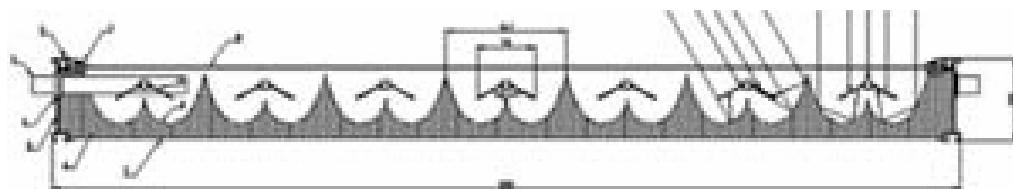


Figura 13 – Corte frontal do CPC fabricado pela empresa AO SOL

2.4 Antecedentes bibliográficos mais relevantes no estudo dos CPC de baixa relação de concentração

Tabela 1 – Resumo bibliográfico do que foi feito e das lacunas existentes no estudo dos CPC com baixa relação de concentração.

TIPO	FIGURA	AUTOR/ES)	PROPRIEDADES OTICAS E GEOMÉTRICAS	ENERGIA COLETADA
Absorvedor tubular evacuado 1,64X		O'Gallagher, et al. 1982	SIM	SIM
Absorvedor tubular não-evacuado 1,5X		Collares-Pereira 1985	SIM	SIM
Absorvedor 'V' invertido completo(wedge) 1-2X		Baum e Gordon 1985	SIM	SIM
Absorvedor aleta horizontal e vertical 1-1,7X		Gordon 1986	SIM	SIM
Absorvedor 'V' invertido, completamente iluminado		Disponível em: < http://www.aosol.pt > 2003	NÃO	NÃO

3 METODOLOGIA

3.1 Fundamentos teóricos

Seja um concentrador genérico bidimensional mostrado na Figura 14, onde θ_a é o ângulo extremo de penetração do raio do sol no concentrador. O princípio dos raios extremos (WELFORD; WINSTON, 1978) estabelece que todos os raios que penetram no concentrador, dentro de um ângulo extremo θ_a , deverão emergir através do ponto extremo P da saída do concentrador.

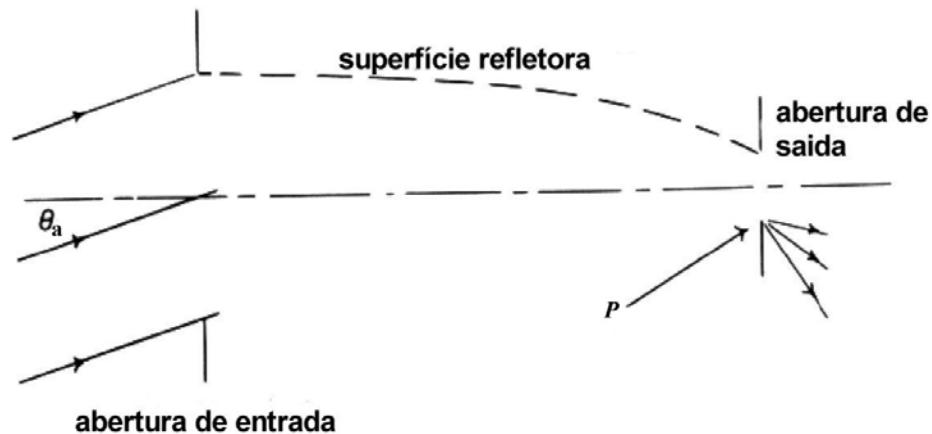


Figura 14 – Princípio dos raios extremos

A solução para a superfície que respeita este princípio é bastante trivial à medida que é bem conhecido que uma parábola, com seu eixo paralelo à direção θ_a e com foco em P, satisfaz essa condição conforme pode ser visto na Figura 15.

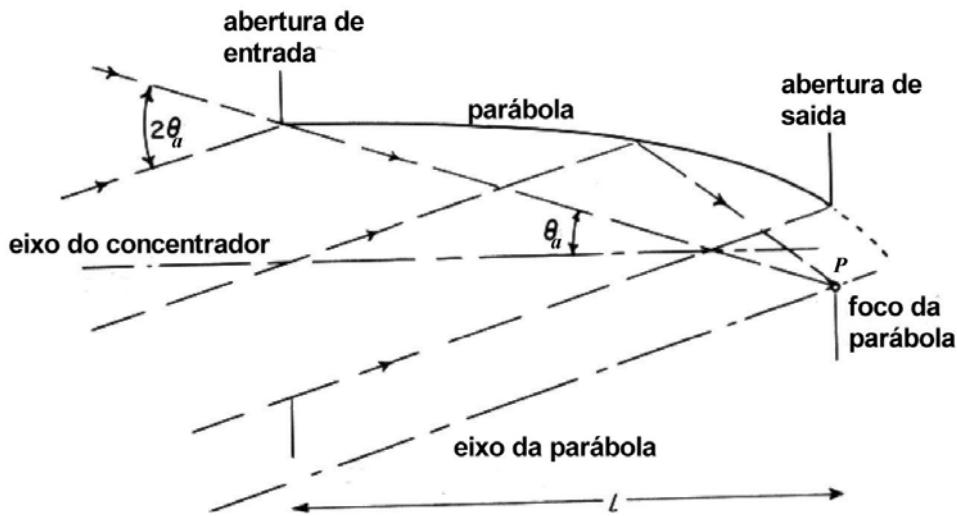


Figura 15 – Construção do perfil do refletor do CPC mediante a aplicação do princípio dos raios extremos

3.1.1 Equação da parábola na forma polar

Por conveniência, será utilizada a representação polar da equação parábola conforme a Figura 16. Esta figura mostra uma parábola genérica, com seus respectivos elementos: uma semi-reta auxiliar BC chamada de geratriz, o raio polar r que compreende a distância do ponto F(foco) ao ponto genérico A, ϕ o ângulo polar e f a distância focal. A equação polar para essa parábola é dada por:

$$r = \frac{2f}{1 + \cos(\phi)} \quad (3)$$

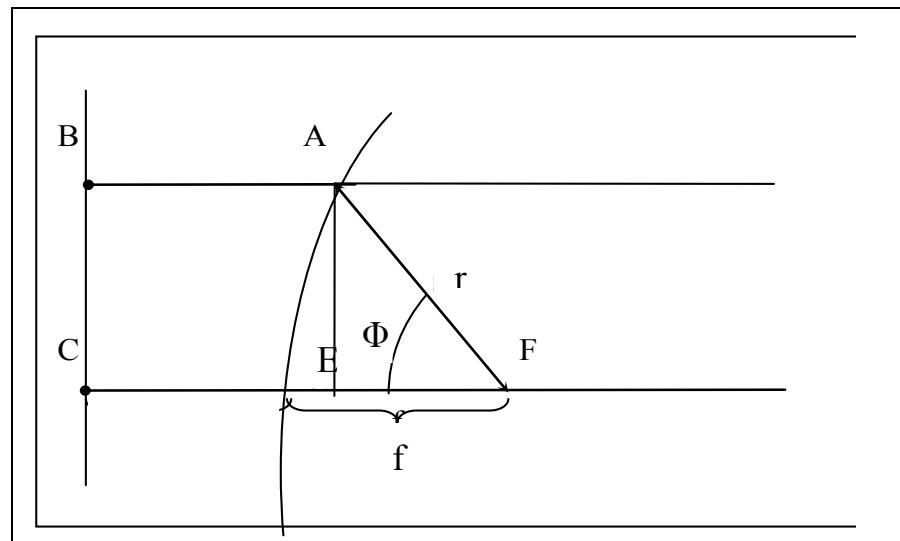


Figura 16 – Elementos de uma parábola genérica

3.2 Involuta – Generalização do princípio dos raios extremos para absorvedor não plano

A generalização do princípio dos raios extremos (WELFORD; WINSTON, 1978) para um absorvedor tubular genérico, secção não necessariamente circular, (Figura 17) diz que todos os raios que penetram no concentrador dentro de um ângulo coletor extremo θ_a deverão emergir tangentes ao absorvedor após uma reflexão.

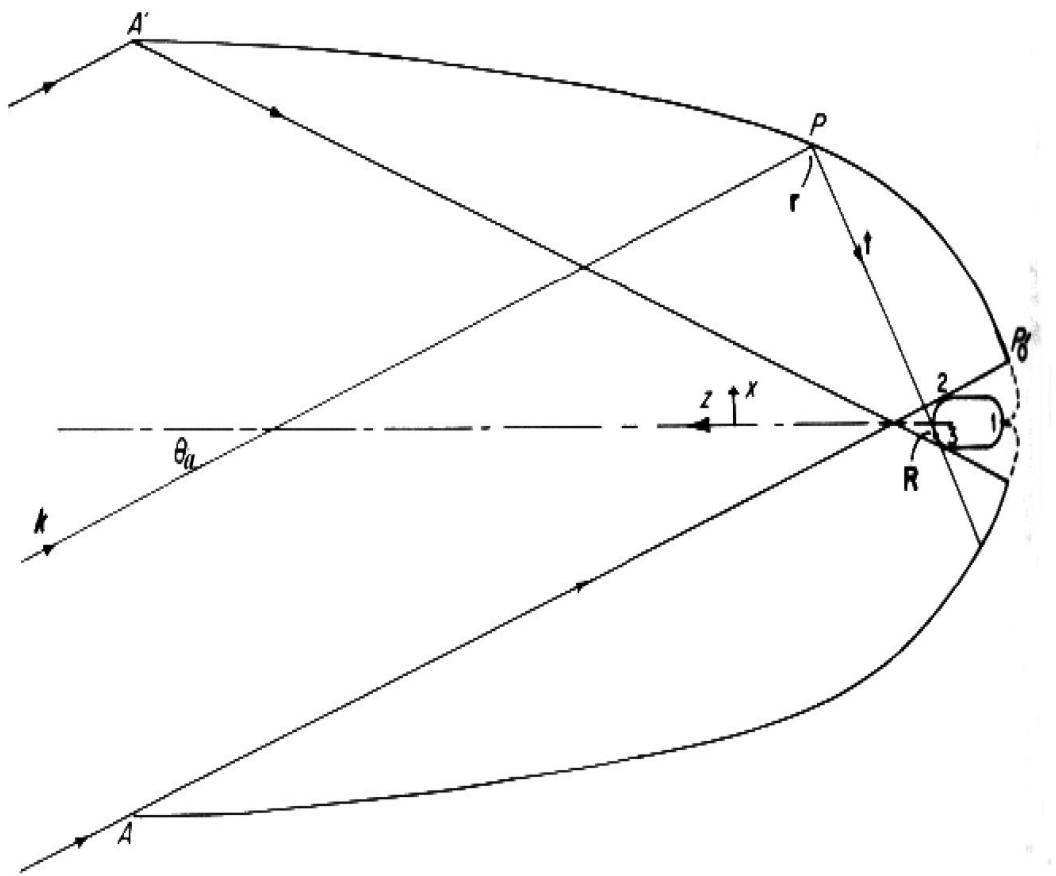


Figura 17 – Generalização do princípio dos raios extremos para absorvedor não-plano

3.3 Cavidade concentradora

3.3.1 Propriedades geométricas

A Figura 18 mostra os parâmetros geométricos de uma cavidade CPC com absorvedor V invertido, nas condições nominal e quando truncado. Como será visto em mais detalhes nas seções seguintes, a porção superior da superfície refletora é quase perpendicular à abertura e, desta forma, contribui muito pouco para a relação de

concentração. Portanto, do ponto de vista da economia de material, a altura da cavidade pode ser significativamente reduzida (truncada) para valores próximos daqueles dos coletores planos (10 cm), sem sacrifício excessivo do seu desempenho. Os parâmetros geométricos nominais da cavidade são vistos à esquerda e os parâmetros truncados à direita. H é a altura da cavidade, X a semi-abertura, L o semi-perímetro do refletor, θ_a o ângulo de aceitação nominal da cavidade. O subscrito t indica a condição de cavidade truncada.

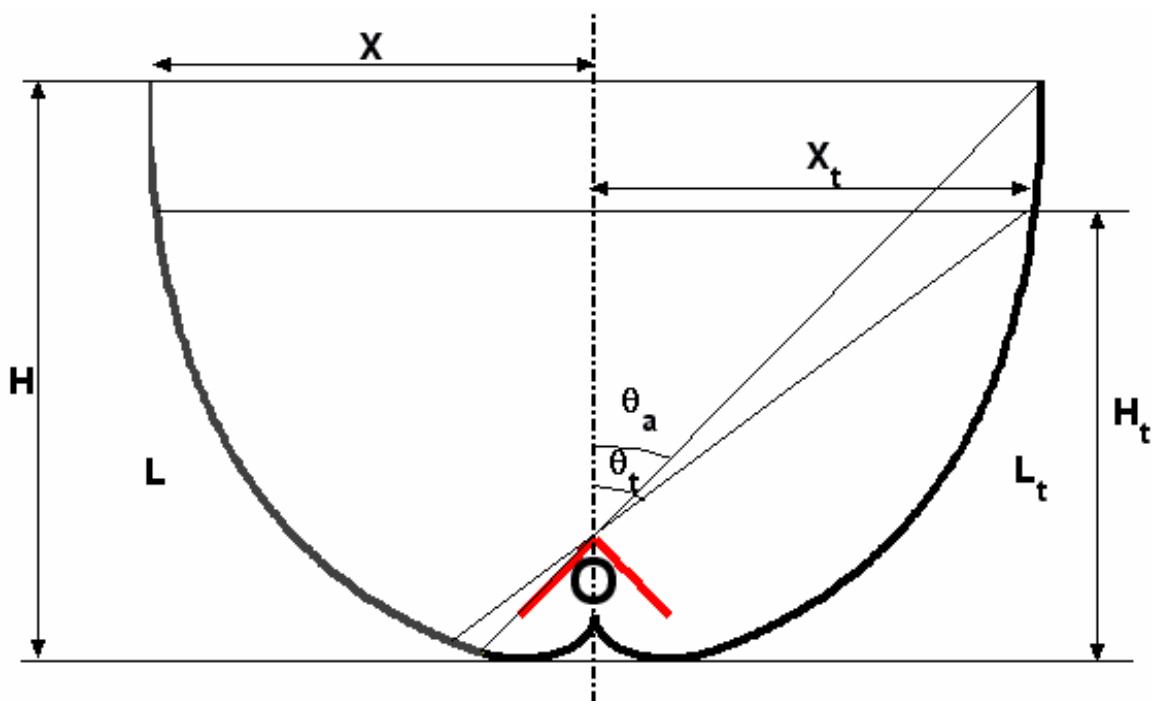


Figura 18 – Parâmetros geométricos da cavidade do CPC com absorvedor V invertido completamente iluminado nas condições truncada (direita) e nominal (esquerda)

3.3.2 Princípios de construção da cavidade refletora

Os principais elementos de construção que compõe as curvas do CPC são mostrados na Figura 19 que exibe a parte direita da cavidade concentradora, a parte esquerda é simétrica. Os pontos F_1 , F_2 e F_3 são os vértices do absorvedor e também os focos das secções parabólicas, V_1 , V_2 e V_3 são os vértices das parábolas, e_1 , e_2 e e_3 são os eixos de simetria das parábolas e são os raios extremos que passam pelos focos, γ o semi-ângulo do vértice do absorvedor, $r/2$ é o segmento de reta que define a semi-base virtual do absorvedor e θ_a o ângulo de aceitação angular do CPC.

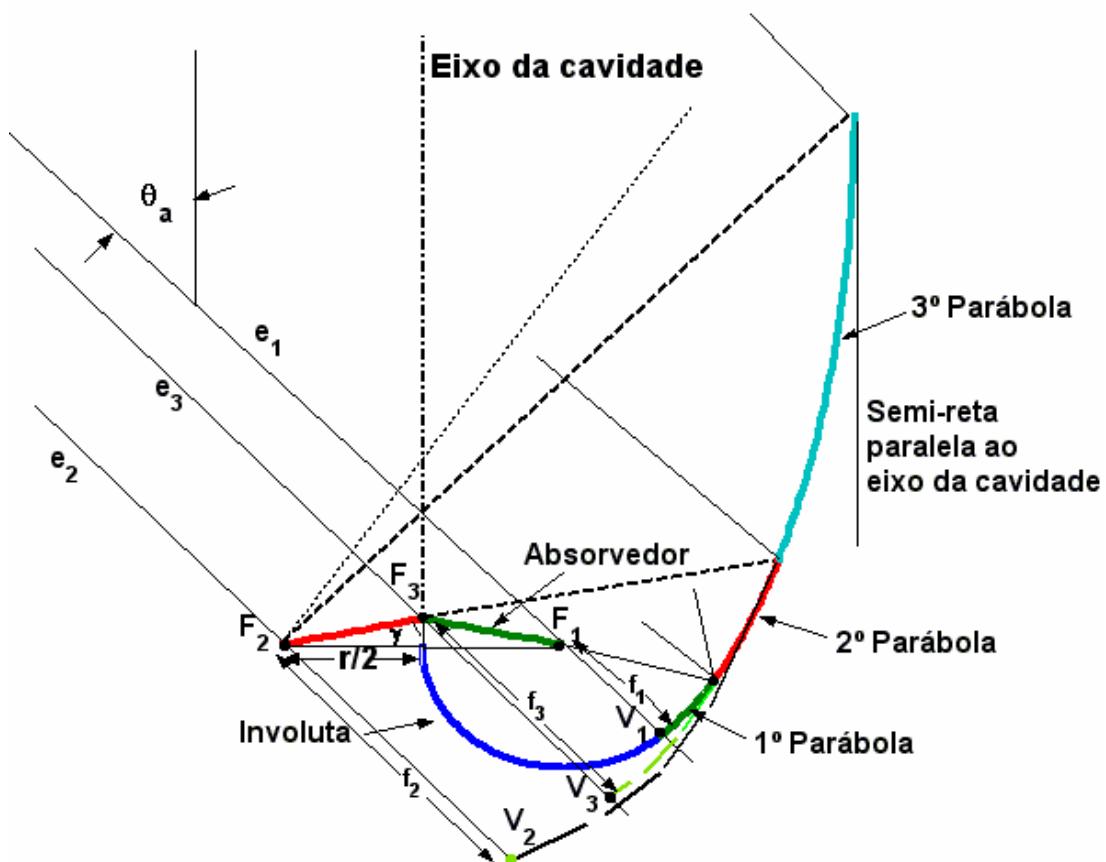


Figura 19 – Definição da construção da cavidade dos CPC

A Figura 20 ilustra a descrição da construção da curva da cavidade refletora do CPC com absorvedor V invertido, completamente iluminado. O arco de circunferência P_1P_2 , que é o primeiro trecho da cavidade, tem seu centro em F_1 é a involuta ao absorvedor (Apêndice A, página.76). A primeira secção refletora parabólica ($P_2 - P_3$) com foco em F_1 começa no final da involuta (ponto P_2) e vai até onde intercepta o segmento de reta ($F_3 - F_1$). A segunda secção parabólica ($P_3 - P_4$), com foco em F_3 , inicia-se em P_3 e termina onde intercepta o segmento de reta ($F_2 - F_3$). Finalmente a terceira secção parabólica ($P_4 - P_5$), com foco em F_2 inicia-se em P_4 e termina quando intercepta o raio extremo que passa por F_2 . As distâncias focais das secções parabólicas f_1 , f_2 e f_3 foram determinadas aplicando-se a condição de continuidade da curva refletora nos pontos P_2 , P_3 e P_4 (observa-se que a tangente das parábolas no ponto comum, fim de uma curva e início da seguinte, terão a mesma derivada, o mesmo ângulo de inclinação em relação a horizontal).

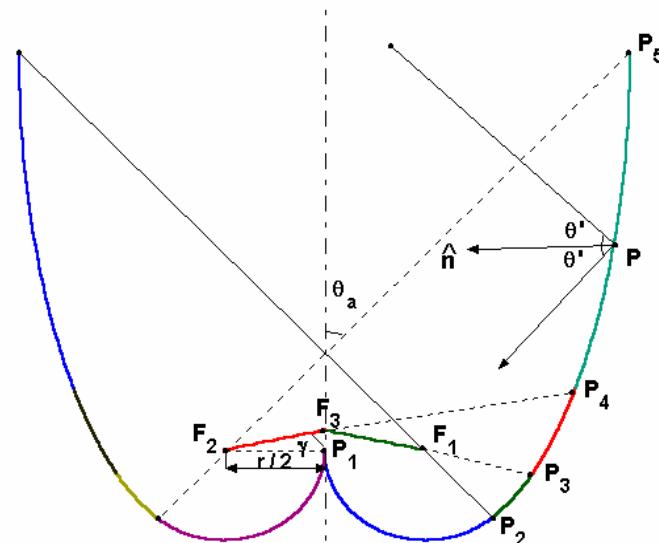


Figura 20 – Concentrador CPC com absorvedor V invertido, completamente iluminado com ângulo de aceitação θ_a e ângulo de vértice do absorvedor igual a γ .

O comprimento da superfície refletora, L para cada secção do refletor pode ser facilmente calculado por meio da expressão geral:

$$L_i = \int_{\phi_i}^{\phi_{i+1}} d\phi \left[r^2 + (dr/d\phi)^2 \right]^{1/2} \text{ ou } L_i = 2^{3/2} f \int_{\phi_i}^{\phi_{i+1}} \frac{d\phi}{(1 + \cos(\phi))^{3/2}} \quad (4)$$

onde, r e ϕ são coordenadas polares e o índice (i) indica o começo de uma dada secção refletora, seja circular ou parabólica. O elemento f representa a distância focal de cada trecho parabólico. O comprimento total da superfície refletora será dado por $\sum 2L_i$.

A altura e a abertura da cavidade são obtidas mediante equações paramétricas da superfície refletora.

3.4 Propriedades óticas

A eficiência ótica (η) de um CPC, com refletividade da superfície refletora maior que 0,75, pode ser bem aproximada mediante a expressão (RABL, 1976):

$$\eta = \rho^{<n>} \quad (5)$$

onde, ρ é o coeficiente de refletividade da superfície refletora (varia de acordo com as características do metal empregado) e $<n>$ é o número médio de reflexões que um raio incidente sofre antes de atingir o absorvedor. Segundo RABL (1976) o número médio de reflexões pode ser calculado por:

$$\langle n \rangle = \frac{A_r}{A_a} E_d \quad (6)$$

onde, A_r é a área da superfície refletora, A_a a área do absorvedor e E_d a fração de energia emitida por uma superfície refletora ideal (refletividade igual a 1) que atinge o absorvedor.

$$E_d = \frac{1}{A_r} \int (1 - \sin \theta') ds \quad (7)$$

onde, ds é o elemento de curva ao longo do refletor e θ' o ângulo entre o raio incidente e a normal a superfície refletora neste ponto (Figura 20). O número médio de reflexões para a cavidade concentradora é dado pela soma das contribuições parciais calculadas para cada uma das secções refletoras, como descritas acima.

O número médio de reflexões para o CPC deste trabalho foi calculado numericamente mediante o uso das eq. (4), eq.(6) e eq.(7).

3.5 Energia térmica mensal e anual coletada pelo CPC

A Figura 18 (página 26) mostrou uma cavidade CPC com um dado ângulo de aceitação nas condições nominais e truncada. Como já foi dito a parte superior do refletor, próxima à abertura é praticamente vertical, portanto a sua eliminação mediante um truncamento afeta muito pouco a largura da abertura e pode ser um elemento na otimização do CPC. Os efeitos do truncamento são:

- Menor perímetro do refletor;
- Aumento da aceitação da componente difusa;
- Menor número médio de reflexões e
- Menor relação de concentração.

O primeiro efeito tem consequência direta no custo do coletor porque reduz a quantidade do material utilizado; o segundo e o terceiro efeito levam ao aumento da eficiência do equipamento, porque aumentam a fração de radiação que incide sobre o absorvedor, porém o quarto efeito vai em direção contrária, pois aumenta a superfície de perdas térmicas do coletor.

3.5.1 Cálculo da energia térmica média mensal e anual produzida pelo coletor

Para uma dada temperatura de operação do coletor, T_e (temperatura do fluido na entrada do coletor) a energia térmica instantânea gerada é dada por um balanço energético (Figura 21). I_t representa a irradiação solar aceita pelo CPC (coletada), $U\Delta T$ a perda térmica e o termo q_t , indica a energia térmica líquida gerada no coletor. A formulação matemática da energia térmica gerada diariamente está mostrada na eq.(8):

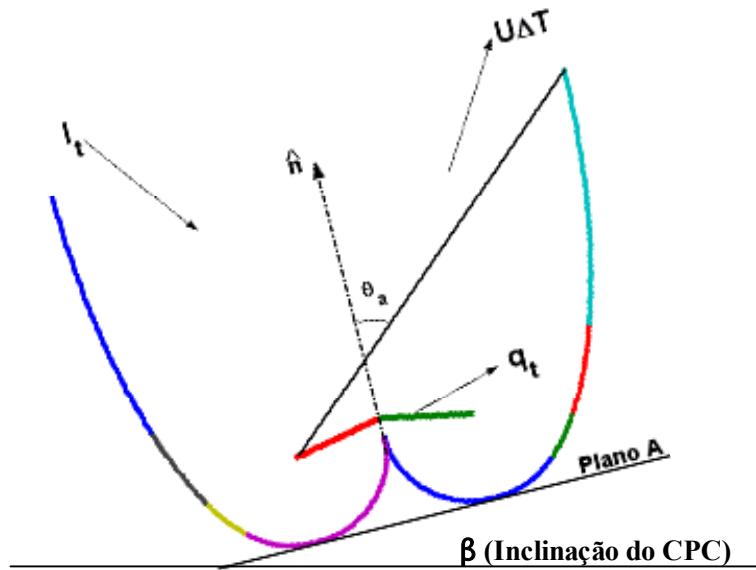


Figura 21 – Representação do balanço de energia em um CPC

$$q_T = F_R \int_{t_i}^{t_f} [\rho^{<n>} \alpha \tau (I_b^c + I_d^c) - U(T_e - T_{amb})] dt \quad (GJ/m^2) \quad (8)$$

onde, T_{amb} é a temperatura ambiente, F_R o fator de remoção de calor do CPC, ρ a refletividade da superfície refletora, $<n>$ o número médio de reflexões, α a absorção do absorvedor, τ a transmitância da cobertura de vidro, t_i e t_f são os instantes do início e fim da coleção de energia térmica e q_T a energia térmica diária.

O valor da energia térmica mensal Q_T^m gerada pelo CPC para um dado mês (m) é :

$$Q_T^m = \sum_i q_T^i \quad (9)$$

O valor da energia térmica anual Q_T^a gerada pelo CPC é dado por:

$$Q_T^a = \sum_m Q_T^m \quad (10)$$

Cada um dos componentes da eq.(8) são referenciados em seguida.

3.5.2 Radiação solar aceita por um coletor CPC

A irradiação solar direta aceita pelo coletor CPC é expressa por (CARVALHO et al., 1987):

$$I_b^c = I_b^n \cos(\theta_i) K(\theta_i) F(\theta_{\perp}) \quad (11)$$

onde, I_b^n é a irradiação solar direta horária normal; θ_i o ângulo de incidência solar; θ_{\perp} a projeção transversal do ângulo de incidência solar; K o modificador de ângulo de incidência e F a função de aceitação angular do CPC.

Como um modificador de ângulo de incidência pode ser adotado a expressão dada por RABL (1981):

$$K(\theta_i) = 1 - 2,02 \cdot 10^{-5} * \theta_i^2 + 4,69 \cdot 10^{-7} * \theta_i^3 - 1,80 \cdot 10^{-8} * \theta_i^4 \quad (\theta_i \text{ em graus}) \quad (12)$$

A irradiação solar horária difusa aceita por um coletor CPC orientado leste-oeste, é dada por:

$$I_d^c = I_d^h \bar{K} / C \quad (13)$$

onde, I_d^h é a irradiação solar horária difusa no plano horizontal; \bar{K} é o valor médio do modificador de ângulo de incidência e C a relação de concentração do CPC. Existe um termo de segunda ordem devido ao espalhamento da radiação solar pelo solo não considerado aqui. O valor médio do modificador de ângulo de incidência é dado por:

$$\bar{K} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} K(\theta_i) \cos(\theta_i) d\theta_i = 0,916 \quad (14)$$

onde, $K(\theta_i)$ é dado pela eq. (12)

3.5.3 Ângulos de incidência solar para coletores CPC

3.5.3.1 Função de aceitação angular

A função de aceitação angular é definida como a fração dos raios incidentes sobre a abertura com ângulo θ que se propagou através da cavidade e incidiu finalmente no absorvedor. É uma propriedade meramente geométrica e não inclui as possíveis absorções no refletor. Para um CPC ideal (não-truncado) a função de aceitação angular é dada por:

$$F(\theta) = 1 \quad \text{se} \quad |\theta| \leq \theta_a$$

$$F(\theta) = 0 \quad \text{se} \quad |\theta| > \theta_a$$

Conforme pode ser visto na Figura 18 (pagina 26) o ângulo de truncamento, θ_t é maior que o ângulo de aceitação nominal, θ_a . Nesse caso a função de

aceitação angular efetiva comporta-se, de forma geral, conforme mostrado na Figura 22 criando uma aba adicional após θ_a . Nessa condição, a função aceitação angular é expressa por:

$$F(\theta) = 1 \quad \text{se} \quad |\theta| \leq \theta_a$$

$$F(\theta) = F_S(\theta) \quad \text{se} \quad \theta_a < |\theta| \leq \theta_t$$

$$F(\theta) = 0 \quad \text{se} \quad |\theta| > \theta_t$$

onde, $F_S(\theta)$ é uma função não nula de θ

Este efeito é de segunda ordem na coleção da radiação solar (CARVALHO et al., 1985), portanto não será considerado no presente trabalho

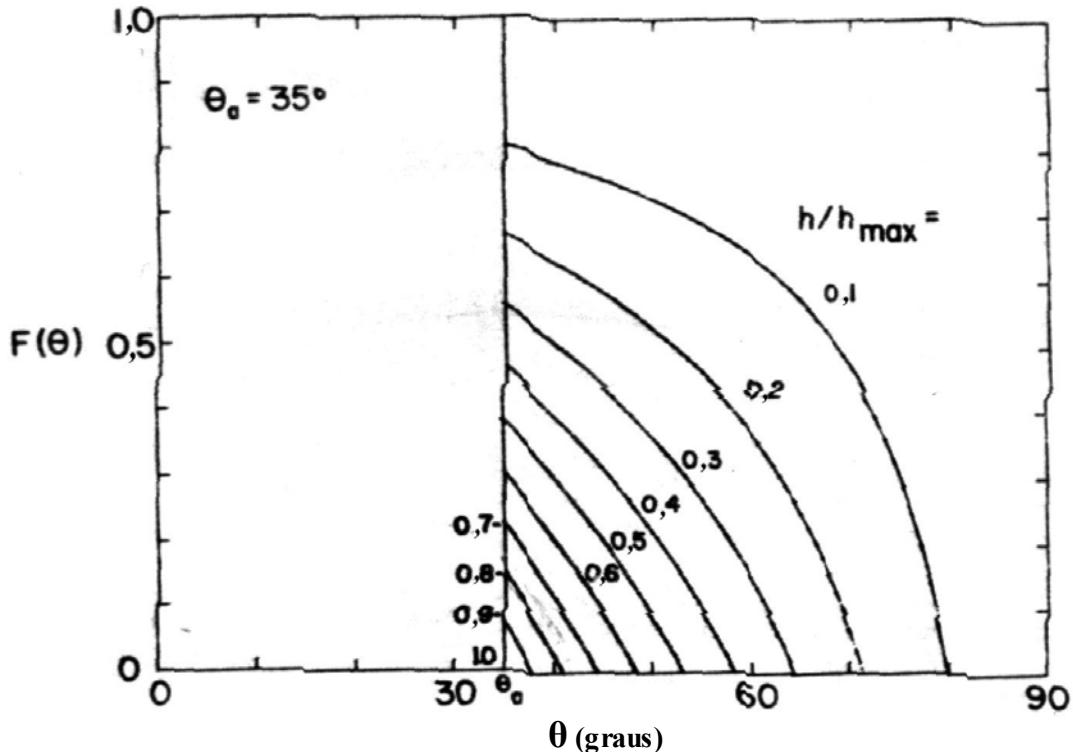


Figura 22– Função aceitação angular para CPC truncados

3.5.3.2 Ângulo de incidência projetado transversalmente e longitudinalmente à cavidade CPC

A Figura 23 mostra o coletor CPC e os ângulos de incidência solar projetados na direção transversal e longitudinal. Por conveniência, é definido o sistema de referência cartesiano do coletor por três versores:

\hat{n}_c = define a direção normal à abertura do CPC

\hat{l}_c = define a direção longitudinal do CPC

\hat{s}_c = define a direção transversal do CPC

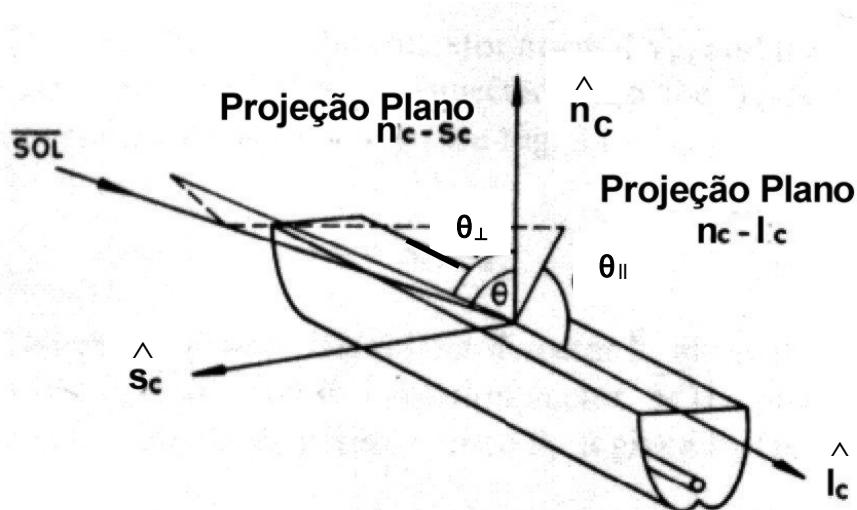


Figura 23 - Definição do sistema de referência do coletor CPC

O ângulo entre a normal ao coletor CPC, \hat{n}_c , e o vetor raio de sol projetado no plano $\hat{n}_c - \hat{s}_c$, θ_{\perp} é dado, conforme PINAZO et al. (1992), por:

$$\operatorname{tg}(\theta_{\perp}) = s_c/n_c \quad (15)$$

O ângulo entre o versor longitudinal do CPC, \hat{l}_c e o raio de sol projetado no plano $\hat{n}_c - \hat{l}_c$, θ_{\parallel} é dado por:

$$\operatorname{tg}(\theta_{\parallel}) = l_c/n_c \quad (16)$$

Para o coletor CPC com absorvedor alinhado na direção leste-oeste (azimute zero) e ângulo em relação à horizontal local igual a β , o ângulo de incidência solar transversal, θ_{\perp} é dado por:

$$\operatorname{tg}(\theta_{\perp}) = \frac{\cos \delta \operatorname{sen} \lambda \cos \omega - \operatorname{sen} \delta \cos \lambda - \operatorname{tg} \beta \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \lambda - \operatorname{tg} \beta \cos \delta \cos \lambda \cos \omega}{\operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \lambda + \cos \delta \cos \lambda \cos \omega + \operatorname{tg} \beta \cos \delta \operatorname{sen} \lambda \cos \omega - \operatorname{tg} \beta \operatorname{sen} \delta \cos \lambda} \quad (17)$$

O angulo de incidência solar longitudinal, θ_{\parallel} é expresso por:

$$\operatorname{tg}(\theta_{\parallel}) = \frac{\operatorname{sen} \beta \cos \delta \operatorname{sen} \lambda \cos \omega - \operatorname{sen} \beta \operatorname{sen} \delta \cos \lambda + \cos \beta \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \lambda - \cos \beta \cos \delta \cos \lambda \cos \omega}{\cos \delta \operatorname{sen} \omega} \quad (18)$$

Para o caso particular onde a inclinação em relação a horizontal é igual à latitude ($\beta = \lambda$) as expressões acima se reduzem:

$$\operatorname{tg}(\theta_{\perp}) = -\frac{\operatorname{tg} \delta}{\cos \omega} \quad (19)$$

$$\operatorname{tg}(\theta_{\parallel}) = \frac{1}{\operatorname{tg}\omega} \quad (20)$$

3.5.3.3 Variação sazonal do ângulo de incidência transversal

A Figura 24 mostra o comportamento sazonal do ângulo de incidência transversal θ_{\perp} em função da hora solar para um coletor CPC com absorvedor alinhado na direção leste-oeste e inclinado em relação a horizontal local com ângulo β igual à latitude de Recife. Essa figura permite visualizar o número de horas de coleção da irradiação para um CPC com um ângulo de aceitação nominal dado. Assim, por exemplo, para um ângulo de aceitação de 40° este coletor irá operar, no mínimo, cerca de 8 horas por dia no ano (dias 21 de junho e 21 de dezembro são os dias onde ocorrem os mínimos).

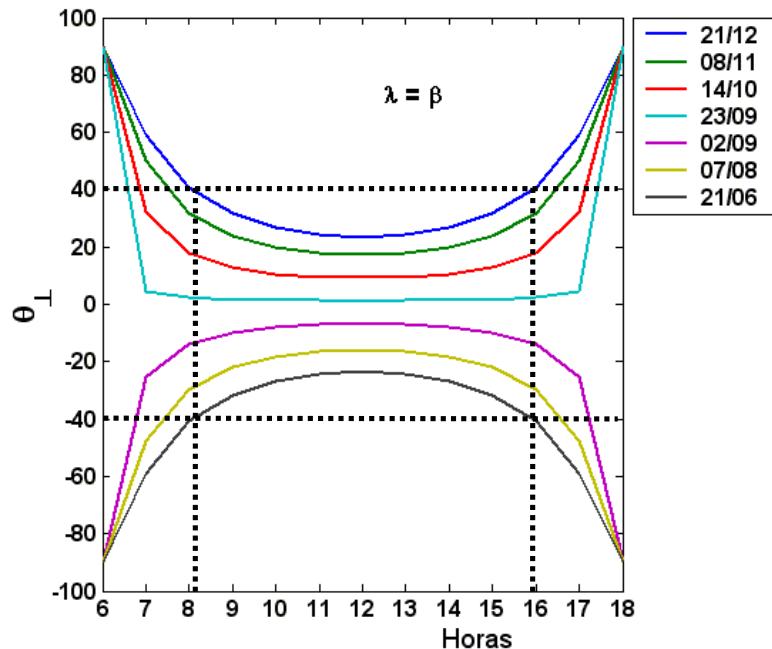


Figura 24 – Variação sazonal do ângulo de incidência transversal de um CPC

3.5.4 Coeficiente de perdas térmicas do coletor

O coeficiente de perdas térmicas do coletor CPC foi aproximado por uma curva empírica derivada de trabalhos teóricos e experimentais (RABL, 1976; 1980) adequada para a faixa de concentração nominal de $1 < C < 2$.

$$U = 1,0 + \frac{2,5}{C} \text{ (W / (}^{\circ}\text{Cm}^2\text{)} \quad (21)$$

3.6.4.1 Temperatura ambiente do dia médio mensal

A distribuição da temperatura ambiente, ao longo do dia, foi aproximada pela metodologia de SPIRITO; VITALE (1982), modificada por LYRA (1992), calculada a partir das temperaturas média, mínima e máxima diárias. Também foi feita uma aproximação para essas temperaturas diárias, a partir dos valores medidos para os dias médios de cada mês do ano. Esses valores diários das temperaturas foram obtidos através da expansão do programa computacional desenvolvido por FRAIDENRAICH; ROLIM².

3.5.4.2 Cálculo da radiação solar horária no plano do coletor

A irradiação solar horária no plano do coletor para todas as horas e dias do ano (365), foi calculada conforme a metodologia de geração de séries temporais sintéticas de radiação solar diária (AGUIAR et al., 1988) e sua desagregação horária

² FRAIDENRAICH, N.; ROLIM, M.M. (Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE)
Influência da estratificação do armazenador térmico no desempenho dos sistemas heliotérmicos. (Em elaboração).

utilizando as correlações de COLLARES-PEREIRA; RABL (1979). A ferramenta computacional que permite este cálculo está contida no Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA et al., 2003).

3.6 Fundamentos computacionais

Na Figura 25 é mostrado o fluxograma resumido do código computacional desenvolvido na linguagem MATLAB (2002) para calcular todos os parâmetros geométricos e óticos dos concentradores CPC com absorvedor V invertido, completamente iluminado. Os dados de entrada são:

- Concentração nominal;
- Dimensão da base do absorvedor e
- Ângulo do vértice do absorvedor

Um segundo programa para determinação da energia térmica horária gerada pelo coletor foi elaborado. O fluxograma resumido do programa está mostrado na Figura 26. Os valores da radiação solar horária incidente no plano de abertura do coletor CPC foram calculados com a ferramenta de cálculo contida no Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA et al., 2003), desenvolvido pelo grupo FAE/DEN/UFPE. Como os cálculos para a produção da energia térmica anual gerada pelo CPC requerem um grande número de valores horários de radiação solar direta, difusa, temperatura ambiente (8760 para cada componente) além dos parâmetros geométricos e óticos do

CPC, a primeira parte do programa foi elaborada para leitura e organização desses dados, que estavam em ambiente distinto ao MATLAB.

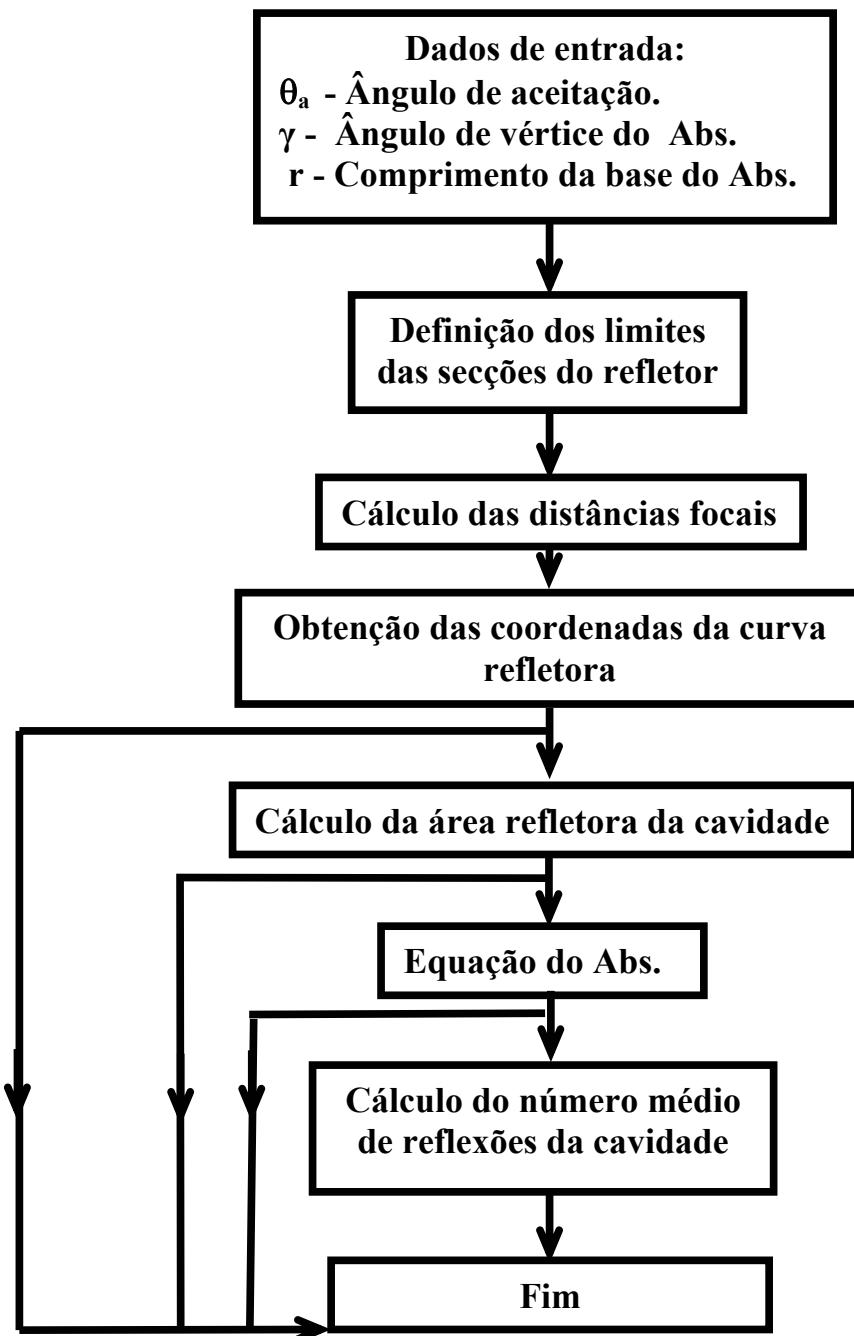


Figura 25 – Fluxograma do código para cálculo das propriedades óticas e geométricas da cavidade dos CPC.

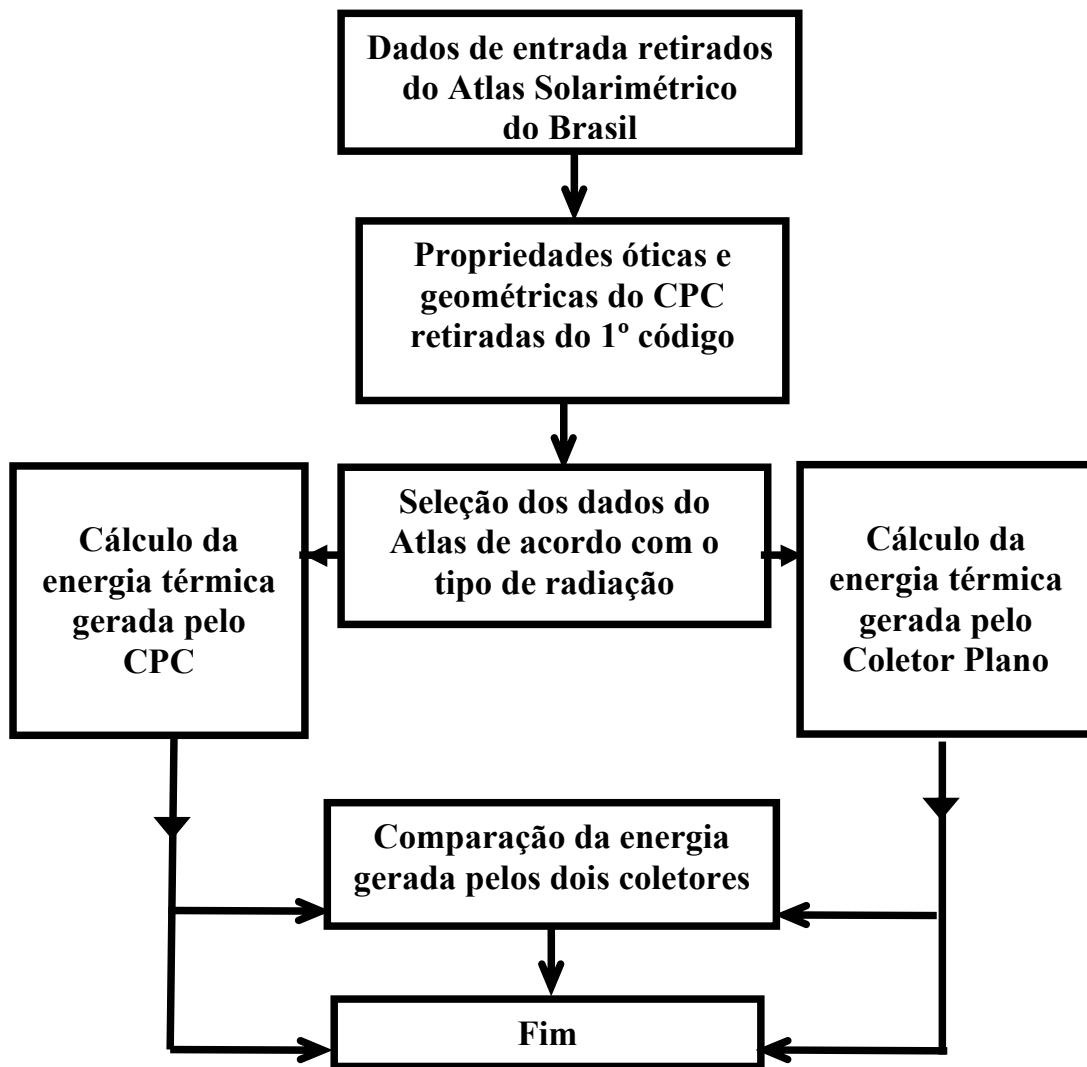


Figura 26 – Resumo do fluxograma de geração da energia térmica anual pelo CPC

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Equações da curva refletora e do número médio de reflexões de um CPC

Uma representação do CPC com absorvedor V invertido, completamente iluminado, pode ser vista na Figura 27, onde $r / 2$ é o segmento de reta que define a semi-base virtual do absorvedor, os pontos F_1 , F_2 e F_3 são os focos das três secções parabólicas, θ_a é o ângulo de aceitação angular do CPC e γ o semi-ângulo de vértice do absorvedor. As equações que descrevem a superfície refletora foram construídas de acordo com a metodologia descrita no capítulo 3.

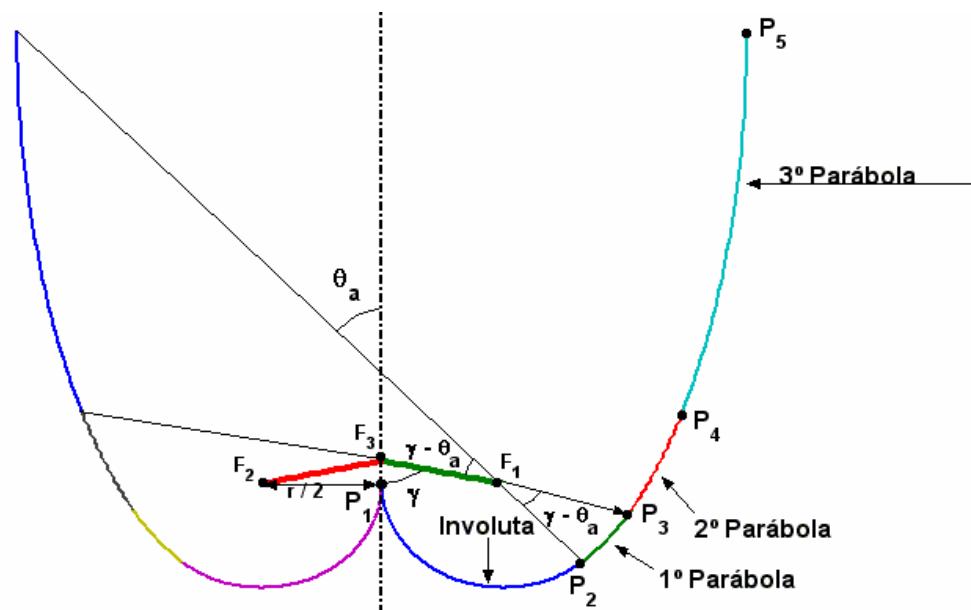


Figura 27 – Cavidade de um CPC: limites das diversas secções do refletor.

As equações derivadas para a superfície refletora e o número médio de reflexões conforme FRAIDENRAICH (2003)³, são:

Involuta (secção P₁P₂)

$$x = \frac{r}{2} [1 + \cos(\phi)] \quad (22)$$

$$y = \frac{r}{2} \sin(\phi) \quad (23)$$

onde, $\pi \leq \phi \leq (\theta_a + 3\pi/2)$

Número médio de reflexões na involuta

$$\langle n \rangle = \frac{1}{4} (\pi/2 + \theta_a) \operatorname{sen}(\gamma) \quad (24)$$

onde, r é o raio vetor e ϕ o ângulo formado entre o raio vetor e o eixo da parábola que está inclinado de θ_a em relação ao eixo da cavidade e γ semi-ângulo de vértice do absorvedor.

Primeira secção parabólica (secção P₂P₃)

$$x = f_1 \left[1 + \frac{2 \cos(\phi)}{1 + \sin(\theta_a - \phi)} \right] \quad (25)$$

³ FRAIDENRAICH, N. Derivação das propriedades geométricas e óticas de concentradores tipo CPC com absorvedor V invertido. Notas de aula, 2003.

$$y = \frac{r \sin(\phi)}{1 + \sin(\theta_a - \phi)} \quad (26)$$

$$f_1 = r/2, \text{ (distância focal)} \quad (27)$$

$$\text{onde, } (\theta_a + 3\pi/2) \leq \phi \leq (\gamma + 3\pi/2)$$

Número médio de reflexões na primeira secção parabólica

$$\langle n \rangle = \frac{A_r}{A_a} - \left[\frac{r(1 - 2 \cos \alpha) / (1 + \cos(\gamma - \theta_a))}{A_a} \right] \quad (28)$$

$$\text{onde, } 0 \leq \alpha \leq (\gamma - \theta_a)$$

Segunda secção parabólica (secção P₃P₄)

$$x = \frac{2f_2}{1 + \sin(\theta_a - \phi)} \cos(\phi) \quad (29)$$

$$y = \frac{r \cos(\gamma)}{2 \sin(\gamma)} + \frac{2f_2}{1 + \sin(\theta_a - \phi)} \sin(\phi) \quad (30)$$

$$f_2 = \frac{r}{2} \left[1 + \frac{1 + \cos(\gamma - \theta_a)}{2 \sin(\gamma)} \right], \text{ (distância focal)} \quad (31)$$

$$\text{onde, } (\gamma + 3\pi/2) \leq \phi \leq (\pi/2 - \gamma)$$

Número médio de reflexões na segunda secção parabólica

$$\langle n \rangle = \frac{A_r}{A_a} - \left\{ \frac{2f_2 \left[\frac{\cos(\gamma - \theta_a)}{1 + \cos(\gamma - \theta_a)} - \frac{\cos(\alpha)}{1 + \cos(\alpha)} \right]}{A_a} \right\} \quad (32)$$

onde, $\gamma - \theta_a \leq \alpha \leq \pi - (\gamma + \theta_a)$

Terceira secção parabólica (secção P₄P₅)

$$x = \frac{2f_3 \cos(\phi)}{1 + \sin(\theta_a - \phi)} - \frac{r}{2} \quad (33)$$

$$y = \frac{2f_3 \sin(\phi)}{1 + \sin(\theta_a - \phi)} \quad (34)$$

$$f_3 = f_2 + \frac{r[1 + \cos(\gamma - \theta_a)]}{4\sin(\gamma)}, \text{ (distância focal)} \quad (35)$$

onde, $(\pi/2 - \gamma) \leq \phi \leq (\pi/2 - \theta_a)$

Número médio de reflexões na terceira secção parabólica

$$\langle n \rangle = \frac{A_r}{A_a} - \left\{ \frac{2f_3 \left[\frac{\cos(\pi - (\gamma + \theta_a))}{1 - \cos(\pi - (\gamma + \theta_a))} + \frac{\cos(\alpha)}{1 + \cos(\alpha)} \right]}{A_a} \right\} \quad (36)$$

onde, $\pi - (\gamma + \theta_a) \leq \alpha \leq \pi - 2\theta_a$

4.2 Propriedades geométricas e óticas dos CPC ideais

Utilizando as equações da superfície refletora, foram geradas cavidades refletoras para os CPC com absorvedor V invertido completamente iluminados ideais (não-truncado) para diversos ângulos de aceitação. A Figura 28 mostra a secção transversal de um CPC com ângulo de aceitação de $45,58^0$, concentração nominal igual a 1,4 e ângulo de vértice do absorvedor igual a 78^0 . A secção desenhada em azul celeste (escuro) é uma involuta circular, em verde, vermelho e azul turquesa (claro) são mostradas as secções parabólicas. A Figura 29 é a visão espacial (3D) do concentrador CPC com ângulos de aceitação de $45,58^0$ e ângulo de vértice do absorvedor igual a 78^0 .

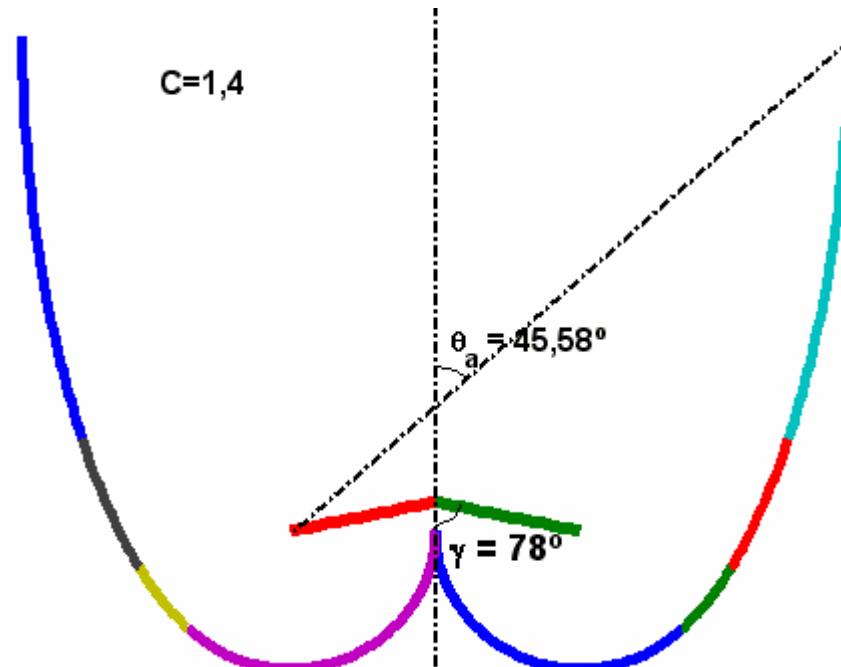


Figura 28 – Cavidade de um CPC com ângulo de aceitação de $45,58^0$, concentração nominal igual a 1,4 e ângulo de vértice do absorvedor igual a 78^0

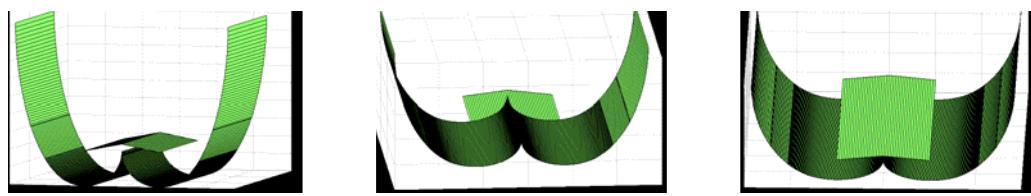


Figura 29 – Desenho 3D de um CPC com absorvedor V invertido, completamente iluminado, sem truncamento e ângulo de aceitação $45,58^0$ com ângulo de vértice do absorvedor igual a 78^0

Observando a Figura 28 e 29 notamos que a porção superior da superfície refletora do CPC é quase perpendicular à abertura e, contribui muito pouco para a sua relação de concentração. Do ponto de vista prático, a cavidade do concentrador CPC pode ser truncada significativamente (podendo chegar à metade da sua altura) tanto para economizar o material refletor como para reduzir a altura do coletor para uma dimensão próxima ao coletor plano, sem sacrificar demasiadamente o seu desempenho. Um estudo detalhado enfocando esse aspecto requer o conhecimento do comprimento da superfície refletora, da altura e do número médio de reflexões do CPC truncado. As Figuras 30, 31 e 32 mostram a relação entre o comprimento da superfície refletora e a abertura, a relação entre altura e a abertura e o número médio de reflexões, em função da relação de concentração (relação de concentração quando o CPC é truncado).

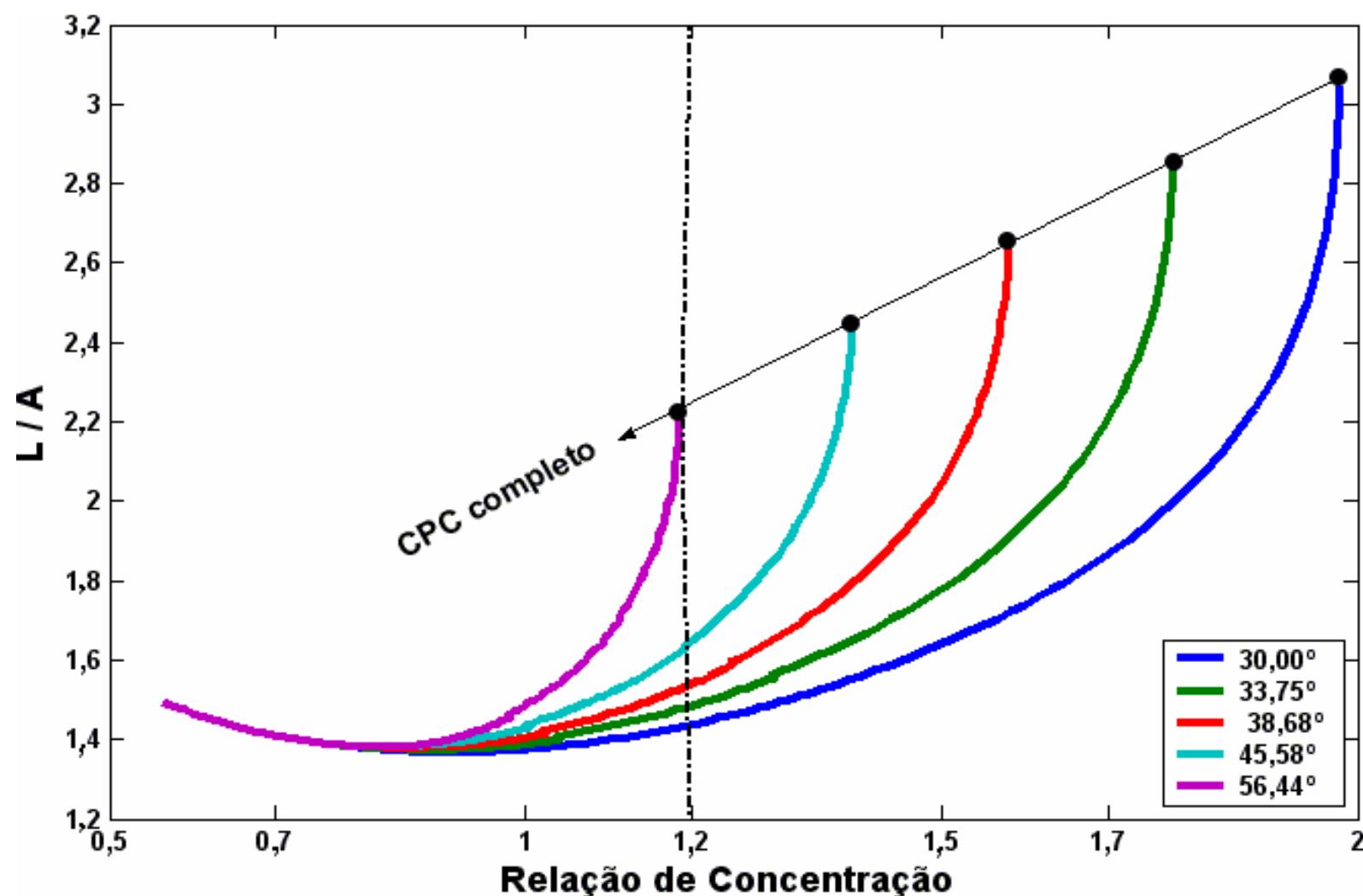


Figura 30 - Relação entre o comprimento da superfície refletora e a abertura, em função da relação de concentração

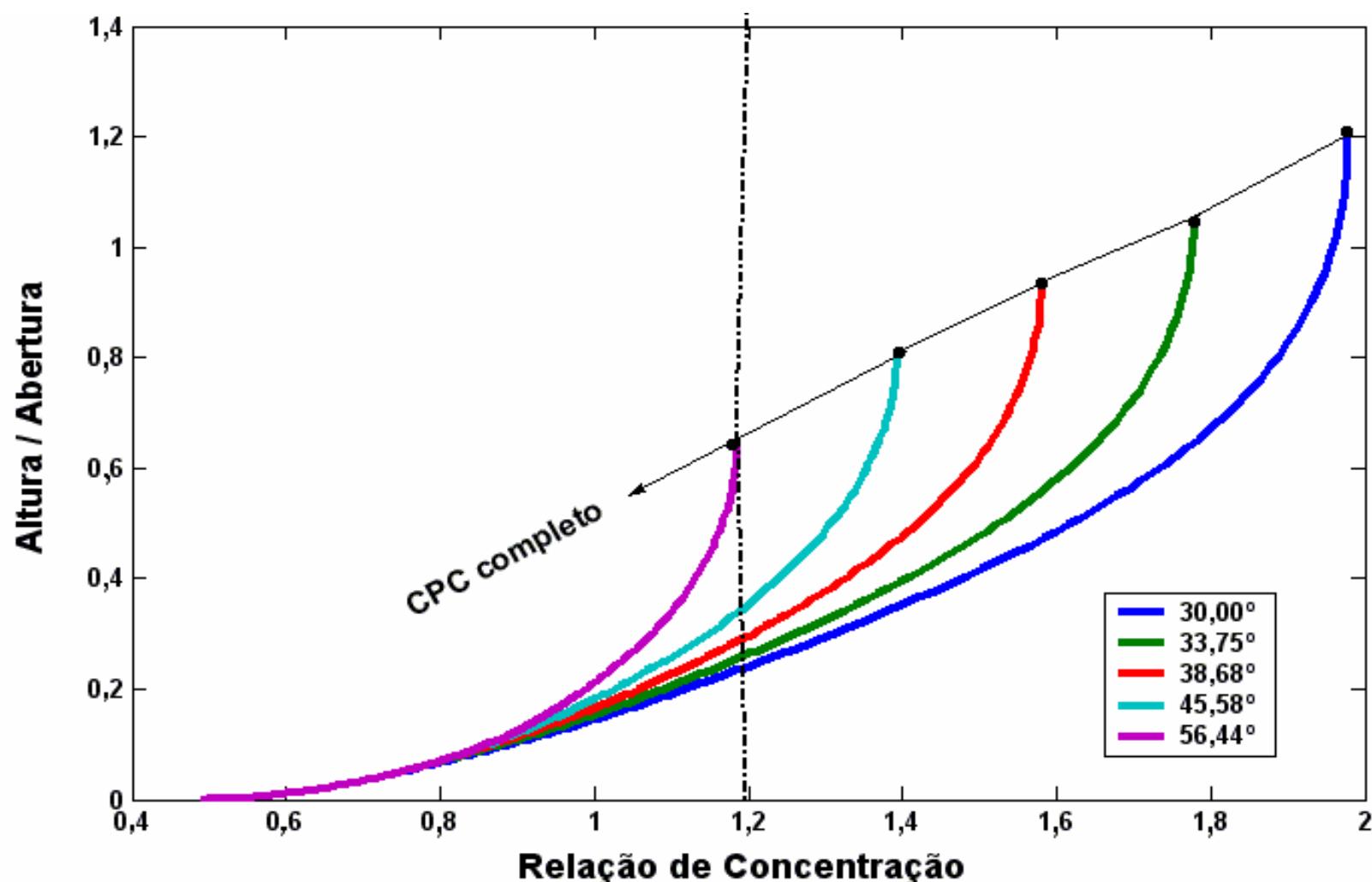


Figura 31 - Relação entre a altura do CPC e a abertura, em função da relação de concentração

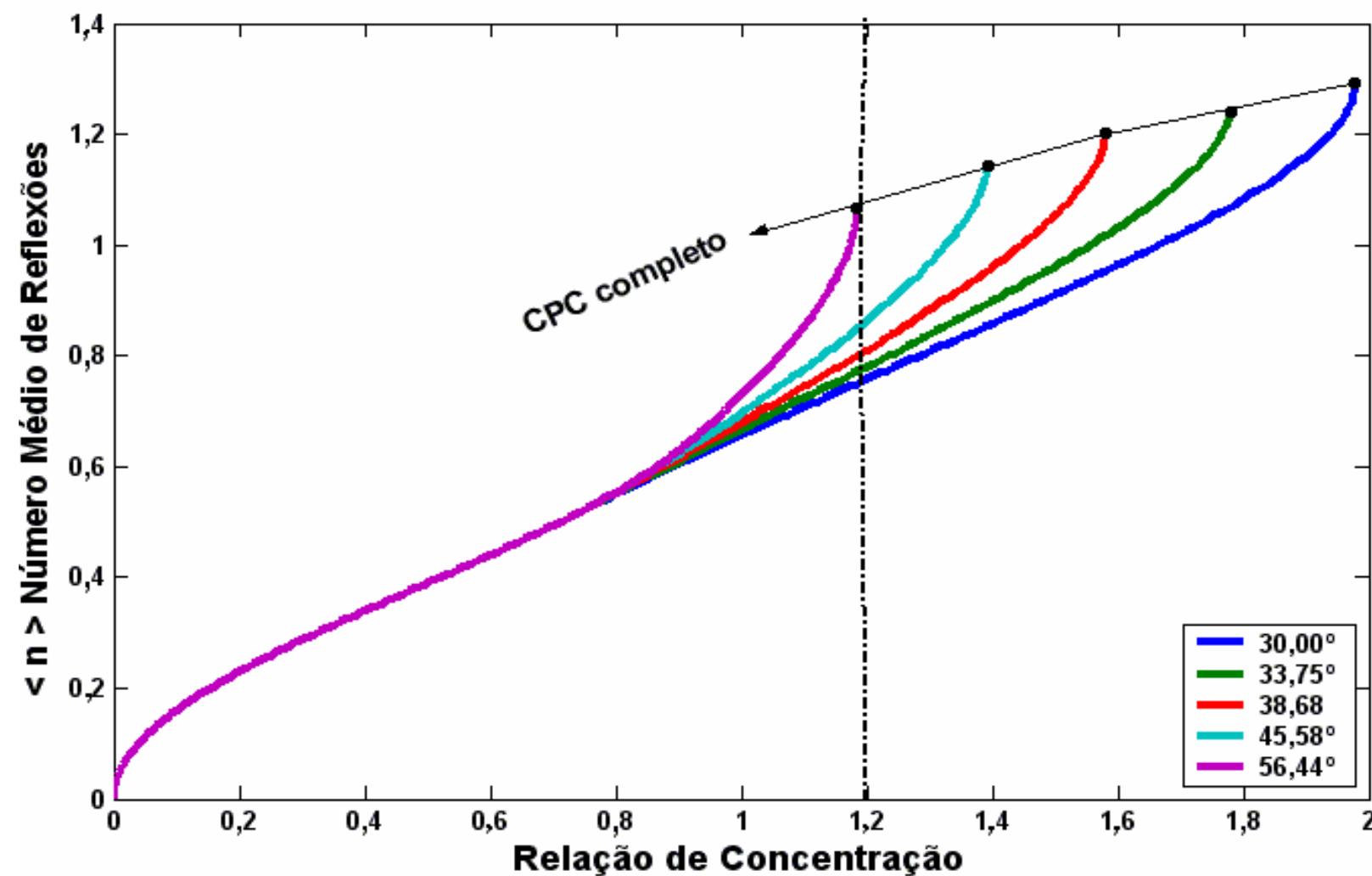


Figura 32 – Número médio de reflexões de um CPC, em função da relação de concentração

Para um CPC situada no intervalo de concentração nominal entre 1,0 e 2,0, a análise das Figuras 30 a 32 indica que o CPC derivado mediante o truncamento da cavidade concentradora de menor ângulo de aceitação é o que tem as melhores propriedades óticas e geométricas. Assim, por exemplo, se for desejada uma relação de concentração de 1,2 as menores relações de comprimento da superfície refletora e abertura, altura e abertura, e número médio de reflexões, ocorrem para o CPC oriundo de concentração nominal 2, ou seja, de ângulo de aceitação de $30,00^0$. Por outro lado, menores ângulos de aceitação se traduzem numa coleção de radiação solar mais reduzida. Também cabe notar que a relação entre a altura e a abertura para a relação de concentração 1,2 situa-se um pouco acima de 0,2, o que possibilita fabricar facilmente um módulo de coletor solar de 2 m^2 (1mx2m) com menos de 10 cm de altura (4 cavidades de 5 cm) que é similar a um coletor plano convencional.

4.3 Otimização do comprimento da superfície refletora em função do ângulo de vértice do absorvedor.

Para o concentrador CPC com absorvedor V invertido completamente iluminado ideal, ou seja, quando a sua concentração nominal é dada por $C=1/\text{sen}(\theta_a)$, o ângulo do vértice do absorvedor que minimiza o comprimento da superfície refletora é igual ao ângulo de aceitação angular da cavidade. Nessa otimização são mantidos constantes o ângulo de aceitação e o tamanho do absorvedor. Essa conclusão foi derivada mediante simulação numérica cujos resultados podem ser vistos na Tabela 2. O comprimento da superfície refletora para um dado ângulo de vértice do absorvedor, $L(\gamma)$ foi normalizado para o caso onde $\gamma=\pi/2$ ou, em outras palavras, quando o

absorvedor é plano ($L(\gamma = \pi/2)$). A simulação foi feita da seguinte forma: para cada ângulo de aceitação foram calculados, para diferentes γ , a relação $L(\gamma)/L(\gamma=\pi/2)$, verificando-se onde ocorria um mínimo nessa última relação.

Tabela 2 – Otimização do comprimento da superfície refletora em função do ângulo de vértice do absorvedor

C_n	θ_a	$L(\gamma)/L(\gamma=\pi/2)$											
		30°	33°	35°	38°	40°	45°	50°	56°	60°	70°	80°	90°
1,2	$56,44^\circ$	-	-	6,88	3,66	2,71	1,62	1,17	0,88	0,89	0,95	0,99	1,00
1,4	$45,58^\circ$	4,26	2,37	1,80	1,31	1,11	0,81	0,83	0,87	0,90	0,96	0,99	1,00
1,6	$38,68^\circ$	1,68	1,16	0,96	0,76	0,75	0,79	0,84	0,88	0,91	0,96	0,99	1,00
1,8	$33,75^\circ$	0,97	0,73	0,71	0,74	0,76	0,80	0,84	0,88	0,91	0,96	0,99	1,00
2,0	$30,00^\circ$	0,67	0,70	0,72	0,75	0,77	0,81	0,85	0,89	0,91	0,96	0,99	1,00

Vale observar a considerável economia de material da superfície refletora em relação ao absorvedor plano, para as concentrações nominais 1,2 e 2: cerca de 12% e 33% respectivamente. Os resultados da Tabela 2 (com a escolha ótima do ângulo de vértice do absorvedor $\gamma = \theta_a$) evidenciam redução no número de parâmetros necessários para otimizar a geometria da cavidade e simplifica, de forma drástica, a superfície refletora do coletor suprimindo a primeira e terceira secções parabólicas do CPC genérico. Como pode ser visto na Figura 27, a abertura angular de construção destas duas parábolas (pontos: P_2-P_3 e P_4-P_5) é a diferença $\gamma - \theta_a$, se $\gamma = \theta_a$ ambas não existirão, o que resulta numa configuração que pode ser vista na Figura 33.

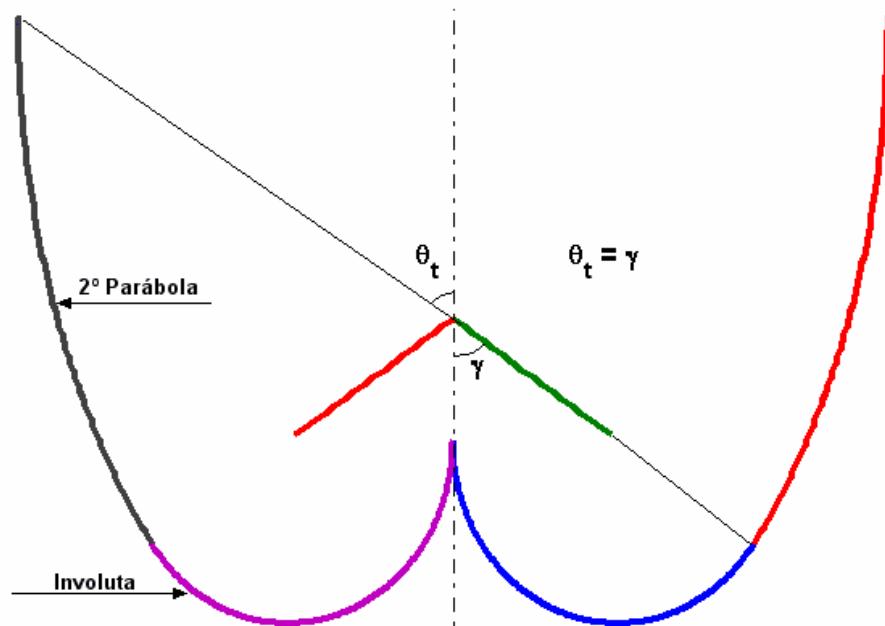


Figura 33 – Configuração da cavidade de um CPC com a escolha ótima do semi-ângulo de vértice do absorvedor $\gamma = \theta_a$

4.4 Otimização da energia solar térmica anual gerada

Como já foram vistos nos resultados anteriores, os efeitos do truncamento no CPC são: menor perímetro do refletor; aumento da aceitação da irradiação difusa, menor número médio de reflexões e menor relação de concentração. O primeiro efeito tem conseqüência direta no custo do coletor na medida em que reduz a quantidade do material utilizado; o segundo e terceiro efeitos levam ao aumento da eficiência do dispositivo na medida em que aumentam a quantidade de radiação que incide no absorvedor. Porém, o quarto efeito vai em direção oposta, pois aumenta a superfície de perdas térmicas do coletor. Assim, a análise custo-benefício do truncamento não é uma tarefa trivial, pois requer uma análise cuidadosa e simultânea dos aspectos óticos e térmicos do coletor, que serão realizados a seguir.

4.4.1 Energia solar térmica gerada em base anual

A energia solar térmica anual gerada foi calculada para o CPC com diferentes ângulos de aceitação e graus de truncamento. Os parâmetros óticos e térmicos utilizados foram:

Local: Recife, PE

$$\gamma = \theta_a$$

$$\iota = 0,90 \text{ (transmitância da cobertura de vidro)}$$

$$\alpha = 0,95 \text{ (absortância do absorvedor)}$$

$$\rho = 0,86 \text{ (refletância do refletor)}$$

$$T_e = 50^0 \text{ C (temperatura de entrada do fluido no coletor)}$$

$$\beta = -8,05^0 \text{ (inclinação do coletor em relação à horizontal local)}$$

$$F_R \text{ (CPC)} = 0,90$$

$$F_R \text{ (Plano)} = 0,854$$

Orientação do coletor: Leste-Oeste, azimute zero (face voltada ao Hemisfério Norte)

As Temperaturas ambientes médias mensais, valores mínimas, médias e máximas utilizadas no presente trabalho, conforme LYRA (1992) estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Temperaturas ambiente médias mensais: valores mínimos, médios e máximos para a cidade de Recife

Mês Temp. média	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
T_{\max} (° C)	30,1	30,2	30,0	29,6	28,5	27,6	27,0	27,1	27,9	28,9	29,5	29,8
T_{med} (° C)	27,0	27,1	27,0	26,6	25,6	24,7	24,2	25,0	25,0	25,9	26,4	26,7
T_{\min} (° C)	24,4	24,5	24,1	23,3	22,5	21,8	21,2	22,4	22,4	23,4	23,9	24,2

Fonte: Lyra (1992)

As Figuras 34 e 35 mostram o número médio de reflexões e a relação entre o comprimento da superfície refletora e a altura para os CPC com ângulos de aceitação iguais a 56,44°; 45,58°; 38,68°; 33,75° e 30,00° (concentrações nominais iguais a 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 e 2,0) e com variados graus de truncamento.

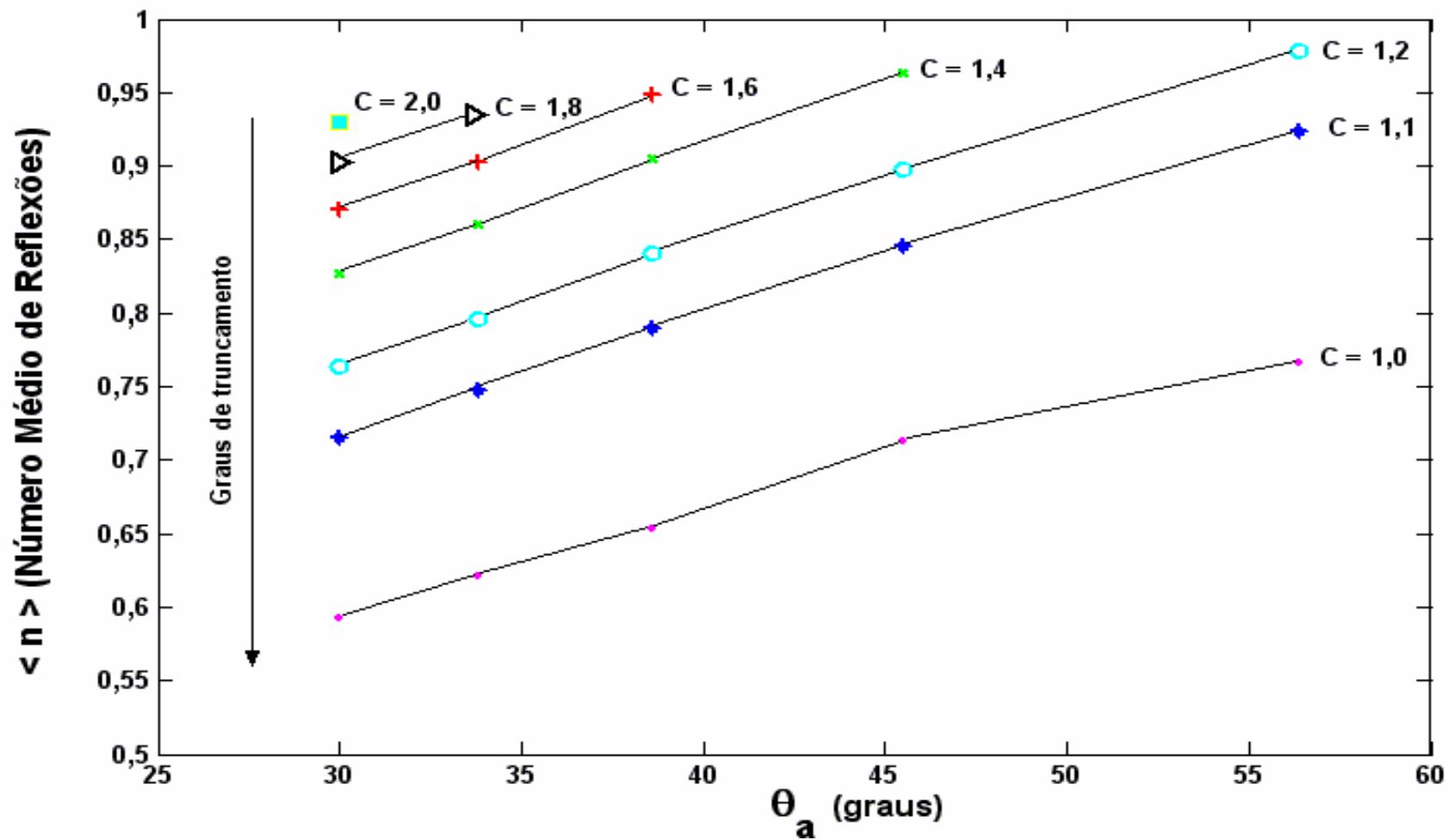


Figura 34 - Número médio de reflexões para diversos CPC ($\gamma = \theta_a$) com variados graus de truncamento

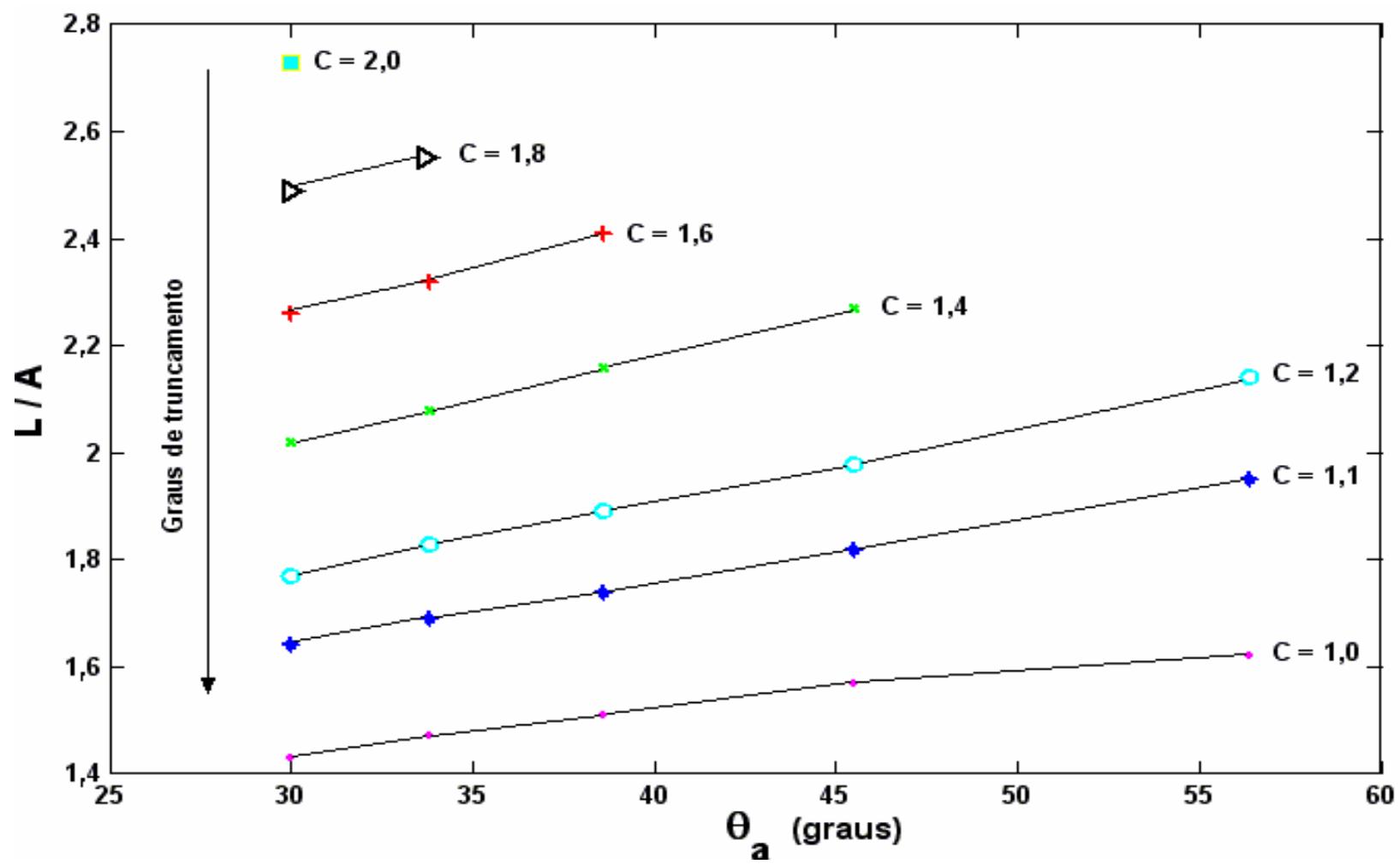


Figura 35 - Relação entre o comprimento da superfície refletora e a abertura para diversos CPC ($\gamma = \theta_a$) com variados graus de truncamento

As Figuras 34 e 35 ratificam os resultados já mencionados na secção 4.2 de que para um CPC com uma dada relação de concentração (por exemplo, de 1,2) as menores relações entre o comprimento da superfície refletora e abertura e o número médio de reflexões ocorrem para o CPC oriundo de ângulo de aceitação menores, ou seja, igual a 30,00º.

A Figura 36 mostra, porém, que para o CPC de relação de concentração 1,2 a energia solar térmica gerada anualmente, com temperatura de operação (temperatura de entrada do fluido) igual a 50º C, apresenta um máximo bastante largo (de 2,85 GJ/m²) para cavidades oriundas de ângulos de aceitação iguais a: 33,75º; 38,68º e 45,58º. Da mesma forma para outras concentrações é possível observar máximos bastante largos e comportamentos similares ao mencionado.

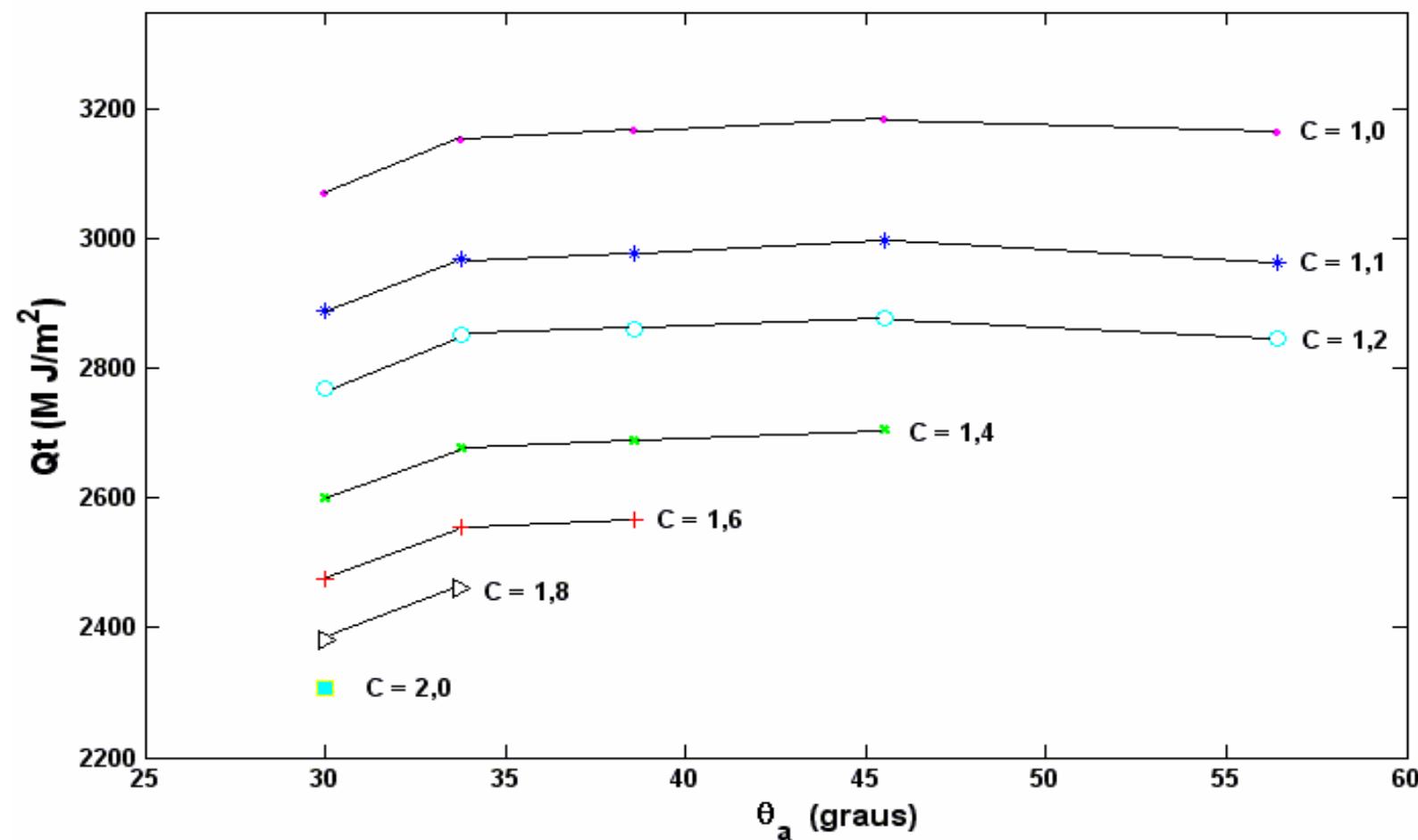


Figura 36 - Energia solar térmica gerada anualmente pelos diversos CPC com variados graus de truncamento e temperatura de operação 50° C.

A Tabela 4 mostra o benefício do truncamento para a coleção anual de energia térmica pelo coletor CPC para o concentrador com ângulo de aceitação de 30° (concentração nominal igual a 2) e temperatura do fluido de 50° C. Para uma relação de concentração de 1,2 a cavidade reduz-se a 47% da original, com um acréscimo de 20% na energia térmica anual coletada quando comparada com a inteira. De acordo com que foi considerado, o truncamento não acarreta modificação na função aceitação angular, ou seja, que esse efeito é desprezível. Assim, esse acréscimo na coleção de energia térmica decorre basicamente da diminuição do número médio de reflexões e do aumento da componente difusa aceita pelo coletor.

Tabela 4 – Relação entre energia térmica anual gerada pelo CPC truncado e não truncado, para ângulo de aceitação de 30 ° (concentração nominal de 2) e temperatura do fluido de 50° C.

C	$\theta_a=30^\circ$	H_t/H	$\langle n \rangle$	$Q_T^{\text{truncado}}/Q_T^{\text{não-truncado}}$
1,0	90	0,21	0,593	1,33
1,1	66	0,38	0,716	1,25
1,2	57	0,47	0,764	1,20
1,4	46	0,63	0,827	1,13
1,6	39	0,76	0,870	1,07
1,8	34	0,88	0,902	1,03
2,0	30	1,0	0,930	1,00

4.4.2 Relação entre a energia solar térmica anual gerada por um CPC e um coletor plano

Para avaliar o quanto um coletor solar tipo CPC com absorvedor V invertido, plenamente iluminado, com baixa relação de concentração, se aproxima de um bom coletor solar plano convencional, no que concerne à energia térmica anual coletada, foi estudada a relação entre a energia térmica anual coletada pelo CPC e pelo coletor plano. O coletor plano considerado é de boa qualidade, possui cobertura de vidro e absorvedor recoberto com superfície seletiva, e tem um coeficiente de perdas térmicas $U = 6,0 \text{ W}/(\text{°C} \cdot \text{m}^2)$. Os outros parâmetros óticos, térmicos e operacionais são os mesmos do CPC anteriormente considerado.

A Figura 37 mostra a relação entre a energia térmica anual gerada pelo CPC e pelo coletor plano, para o Recife, com uma temperatura operacional de 50°C. Observa-se, então, que: qualquer que seja a relação de concentração a energia térmica anual gerada pelo CPC aproxima-se mais do coletor plano para maiores graus de truncamento; para concentrações (truncadas) entre 1,0 a 1,4 existe um máximo largo situado entre os ângulos de aceitação de 33,75° e 45,58°. Finalmente, o CPC de relação de concentração 1,2 gera apenas 2% menos da energia anual gerada pelo coletor solar de placas planas.

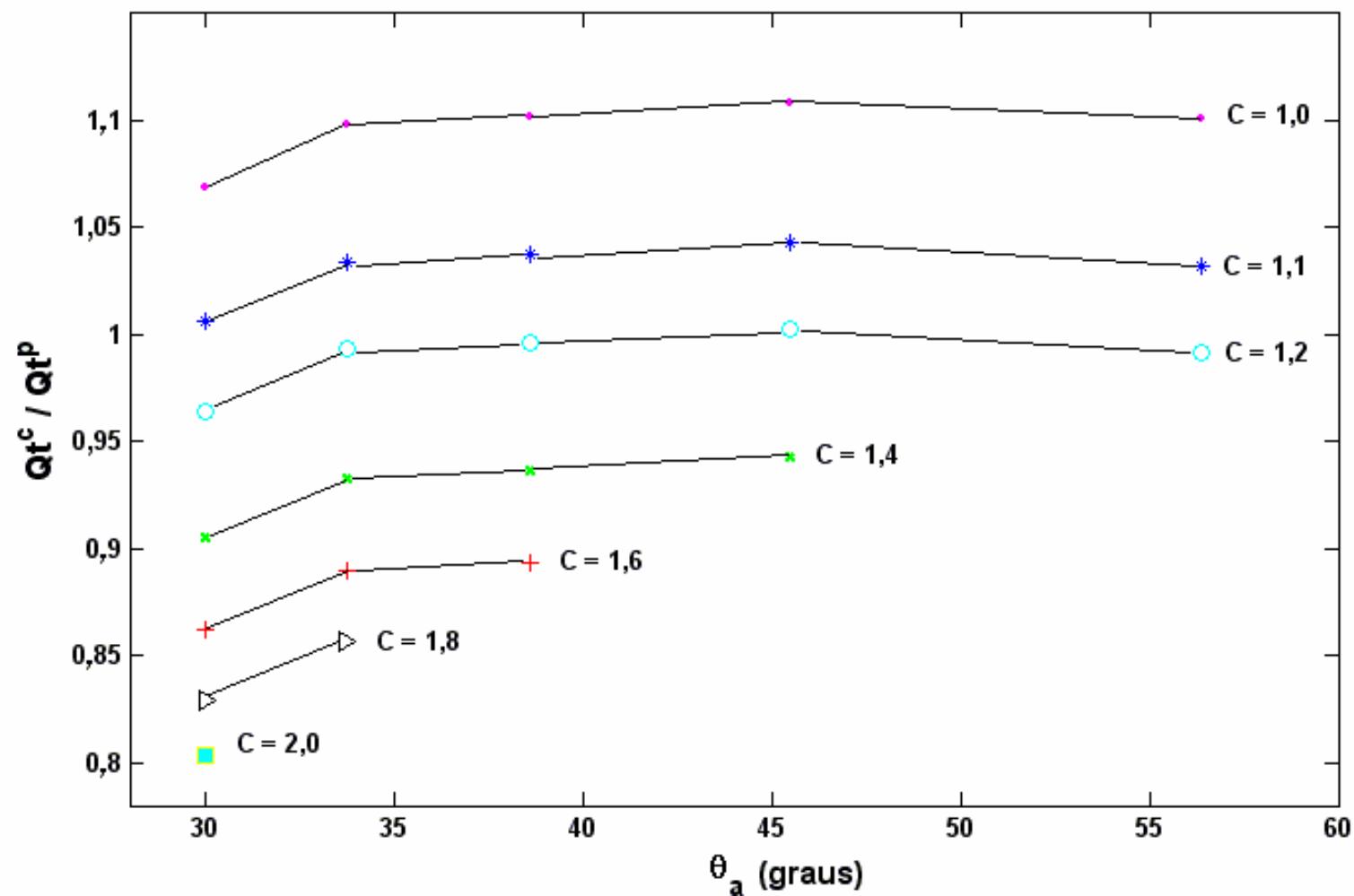


Figura 37 – Relação entre a energia térmica anual gerada pelo CPC e pelo coletor plano para o Recife com temperatura de operação igual a 50° C

A Figura 38 mostra a relação entre a energia térmica anual gerada pelo CPC e pelo coletor plano para o Recife com uma temperatura operacional de 80°C. As mesmas conclusões gerais da Figura 37 são válidas aqui. Adicionalmente cabe ressaltar um fato importante: na medida em que a temperatura operacional cresce, a relação entre a energia térmica anual gerada pelo CPC e pelo coletor plano torna-se maior que 1. Para as concentrações 1,1 e 1,2 estas relações tornam-se 1,40 e 1,35 respectivamente.

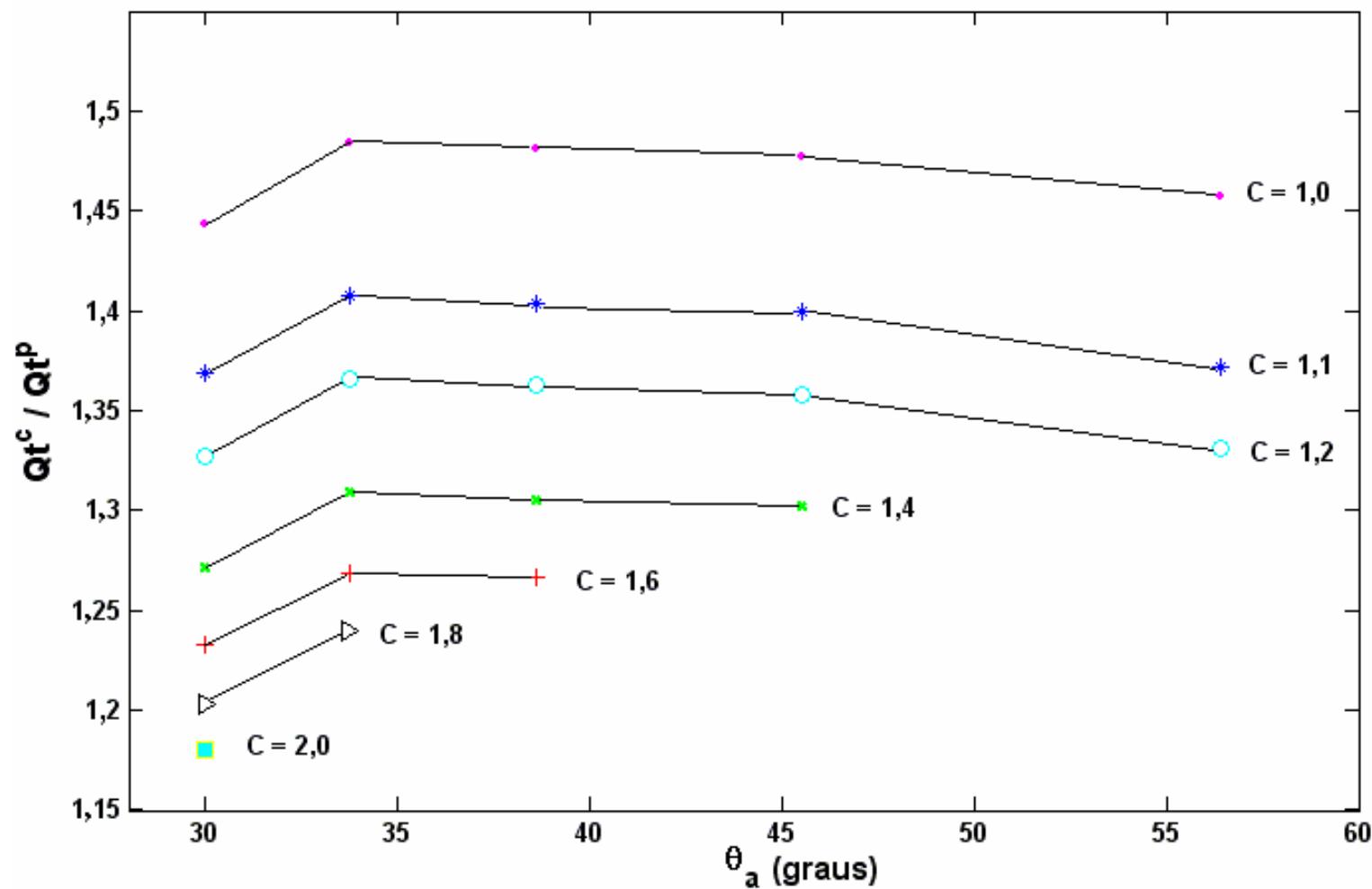


Figura 38 – Relação entre a energia térmica anual gerada pelo CPC e pelo coletor plano para o Recife com temperatura de operação igual a 80° C.

4.4.3 Efeito da refletividade da superfície refletora na relação entre a energia solar térmica anual gerada pelo CPC e coletor plano.

A qualidade da refletividade da superfície refletora afeta, de modo significativo, a relação entre a energia térmica anual gerada pelo CPC e o coletor plano. A Figura 39 mostra este fato para diferentes refletividades da superfície refletora, para o caso de um CPC com relação de concentração 1,2 (oriundo de um CPC com ângulo de aceitação nominal de 30,00 graus) e temperatura do fluido igual a 80° C. A refletividade igual a 0,76 corresponde ao limite inferior de qualidade e refere-se à chapa de alumínio encontrado normalmente no mercado para múltiplas utilidades na indústria metalúrgica. A refletividade 0,96 é o limite superior e são superfícies especiais espelhadas com prata. A refletividade igual a 0,86 é um material de qualidade solar (adequado ao uso na tecnologia solar), disponível no mercado e barato. Conforme a Figura 39, o aperfeiçoamento introduzido pela qualidade do material refletivo é notável: para uma melhoria na refletividade, de 0,86 para 0,96 (11,5%) a relação entre a energia térmica anual coletada pelo CPC e o coletor plano representa uma melhoria de 18% e nessa temperatura o CPC já estaria coletando cerca de 55% a mais de energia térmica anual do que o coletor plano.

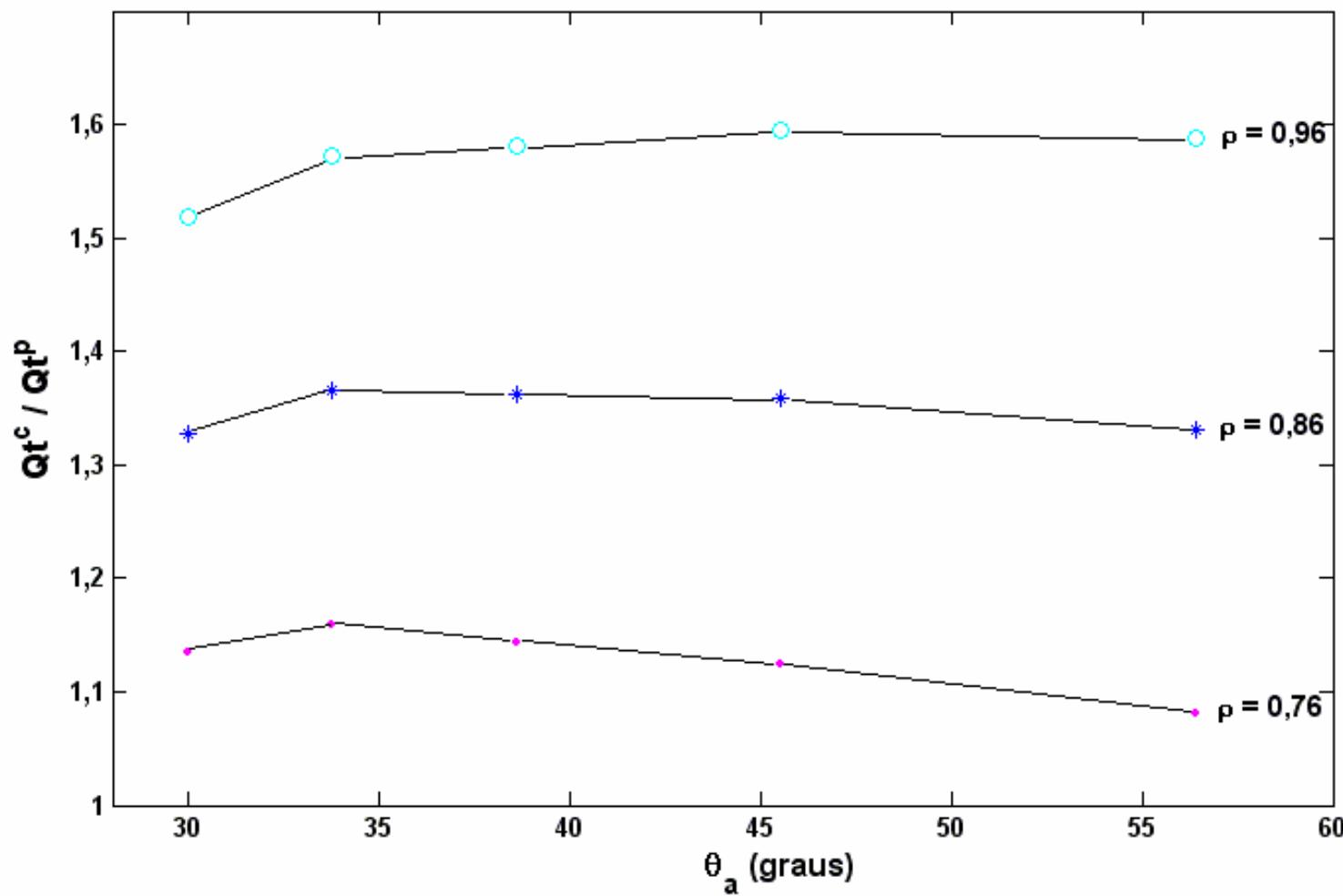


Figura 39 – Efeito da refletividade na relação entre a energia térmica anual gerada por um CPC e um coletor plano. CPC de relação de concentração 1,2 e temperatura de operação de 80° C.

5 CONCLUSÕES

Expressões analíticas que descrevem a superfície refletora, suas propriedades geométricas, óticas e o número médio de reflexões de um coletor tipo CPC com absorvedor V invertido e completamente iluminado foram deduzidos. A curva refletora é descrita por uma involuta circular e mais três secções parabólicas.

Foram construídos dois programas de simulação computacional em MATLAB: o primeiro para a análise das propriedades geométricas e óticas desses CPC e o segundo para simular a energia térmica horária gerada por um CPC, orientado leste-oeste e com uma inclinação qualquer em relação a horizontal local.

Para CPC com absorvedor V invertido completamente iluminado e ideal (sem truncamento) conclui-se que, na configuração em que o seu ângulo de aceitação é igual ao ângulo do vértice do absorvedor, ocorre um mínimo no perímetro da cavidade refletora quando se consideram a concentração nominal e o tamanho do absorvedor constantes.

As análises geométrica e ótica das diferentes configurações do CPC (ângulo de aceitação, concentração nominal e grau de truncamento) mostram que, para uma dada relação de concentração, as menores relações entre o comprimento da superfície refletora, abertura e número médio de reflexões, ocorrem para cavidades CPC oriundas da maior concentração nominal, no caso 2 (ângulo de aceitação igual a 30°). Entretanto, quando se considera também a energia térmica anual gerada, ocorre um valor máximo bastante amplo na região de relação de concentração entre 1,4 - 1,6 (ângulos de aceitação 38,68° e 45,58°).

Um coletor CPC localizado na cidade de Recife com uma relação de concentração 1,2 e superfície refletora cuja refletividade é igual a 0,86 é estacionário e gera anualmente cerca de 2,85 GJ/m² de energia térmica quando opera a 50° C. Este equipamento gera apenas 2% a menos da energia térmica anual gerada por um coletor plano em Recife, operando ambos a 50°C, e 35% a mais que este mesmo coletor, operando ambos a 80°C. A melhoria da refletividade da superfície refletora aumenta sensivelmente esta relação. Por exemplo, para $\rho=0,96$ e temperatura operacional de 80°C o CPC de relação de concentração 1,2 estaria convertendo 55% de energia térmica acima do coletor plano.

Os procedimentos básicos para as otimizações geométrica, ótica e térmica do concentrador tipo CPC com absorvedor V invertido completamente iluminado foram apresentados, e os resultados indicam que os concentradores deste tipo podem ser construídos de forma econômica. Os indícios que reforçam essa assertiva é que o coletor

CPC de concentração nominal 1,2 economizaria cerca de 60% do material absorvedor (chapa, tubo de cobre e superfície seletiva) de um coletor plano à medida que utilizaria somente uma fração igual a C/2 do absorvedor plano. Cabe mencionar também que já existe no mercado filme espelhado com refletividade de 0,86 e de preço bem acessível (*mylar*). Porém, para completar este trabalho recomenda-se uma modelagem do custo dos componentes principais: absorvedor, superfície refletora, cobertura e caixa de proteção e com isso realizar o cálculo do custo unitário da energia térmica anual gerada para cada configuração (ângulo de aceitação, concentração nominal e temperatura de operação). O menor custo da energia térmica gerada é o ponto final da otimização e resultará na configuração escolhida para a construção do protótipo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, R.; COLLARES – PEREIRA, M. A simple procedure for the generation of sequences of daily radiation values using Markov transition matrices. *Solar Energy*, v.40, p.269-279. 1988.
- AO SOL energia renováveis ltd. Disponível em:<<http://aosol.pt/Frame.htm>>. Acesso em: 10 maio 2003.
- BARANOV, V. K.; MELNIKOV, G. K. Study of the illumination characteristics of hollow focons. *Sov. J.Opt.Thechn.*, v. 33, p. 408-411. 1966.
- BARBOSA, E.M.; BAHIA, G.; FRAIDENRAICH, N.; TIBA, C. Perdas térmicas em concentradores parabólicos compostos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 7., Brasília, 1993. *Anais*. Brasília, UNB, 1993.
- BARBOSA, E.M.; FRAIDENRAICH, N.; TIBA, C. Desenvolvimento de coletores CPC de baixo coeficiente de perdas térmica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8., São Paulo, 1985. *Anais*. São Paulo, USP, 1985. p. 5-8.
- BARBOSA, E.M.; FRAIDENRAICH, N.; TIBA, C. Propriedades óticas e geométricas de cavidades CPC. *Publicações internas do DEN-UFPE*, Recife, n.113, 10p.1988.
- BARBOSA, E.M.; FRAIDENRAICH, N.; TIBA, C.; FRAGA, A.N.S. Energia térmica produzida por concentradores CPC com absorvedores cilíndricos. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENERGIA SOLAR, 2 ., Porto, 1988. *Anais*. Lisboa, Porto, 1988.
- BAUM, H.P; GORDON, J.M. Optimal design of nonimaging solar concentrator with wedge receiver. *Applied Optics*, v. 15, p. 2596-2599. 1985.
- CARVALHO, M.J; COLLARES, M; GORDON, M.J. Economic optimization of stationary nonevacuated CPC solar collector. *Journal of Solar Energy Engineering*, v. 109/43. 1987.
- CARVALHO, M.J.; COLLARES, M.; GORDON, J.M.; RABL, A. Truncation of CPC solar collectors and its effect on energy collection. *Solar Energy*, v. 35, p. 393-399, 1985.

- COLLARES-PEREIRA, M. Description and testing of a non-evacuated 1.5 X CPC collector thermal performance comparison with other collector types. *Journal of Solar Energy Engineering*, v.107/277. 1985.
- COLLARES-PEREIRA, M.; RABL, A. The average distribution of solar radiation – correlation between diffuse and hemispherical and between hourly and daily isolation values. *Solar Energy*, v. 22, p.155 .1979.
- EAMES, P.C.; NORTON, B. Detailed parametric analyses of heat transfer in CPC solar energy collectors. *Solar Energy*, n. 4, v.50, p. 321-338. 1993.
- FRAIDENRAICH, N.; DE ANDRADE, I. S.; BARBOSA, E.M. Estudo teórico experimental das perdas de energia térmica de um concentrador parabólico composto. In: ENCIT, 1., 1986. *Anais*.
- FRAIDENRAICH, N.; DE LIMA, C.; TIBA,C.; BARBOSA, E.M. Simulation model of a CPC collector with temperature dependent heat loss coefficient. *Solar Energy*, v. 65, p. 99-110. 1998.
- FRAIDENRAICH, N.; TIBA, C.; BARBOSA, E.M. Projeto e desempenho térmico de coletores solares tipo CPC não-evacuado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 3., Rio de Janeiro, 1984. Rio de Janeiro, UFRJ, 1984. p. 554-563.
- FRAIDENRAICH, N.; TIBA, C.; BARBOSA, E.M.; COSTA, H. Possibilidade da tecnologia solar na oferta de energia térmica de uso industrial. *Revista pernambucana de desenvolvimento*, v.11/2, p. 227-250. 1986.
- GORDON, J.M. Low-Concentration CPC's for Low-Temperature Solar Energy Applications. *Jornal of Solar Energy Engineering*, v.108/49. 1986a.
- GORDON, J.M. Nonimaging solar energy concentrator (CPC's) with fully illuminated flat receiver: a viable alternative to flat-plat collector. *Jornal of Solar Energy Engineering*, v.108, p.252-256. 1986b.
- HINTERBERG, H.; WINSTON, R. Efficient light coupler for threshold Cerenov counters. *Rev. Sci.Instr*, v. 37, p.1094. 1966.
- HSIEH, C.K. Thermal analysis of CPC collectors. *Solar Energy*, v.27, p. 19-29. 1981.
- KREIDER, J.F. *Medium and high temperature solar processes*. New York, Academic Press, 1979, 483 p.

- KUTSCHER, C. F.; DAVENPORT, R.; MAY, K.; DOUGHHERTY, D.; GEE, R.; MASTERSON, M. *Design approaches for solar industrial process heat system supplement to progress in solar energy*. New York, SERI Press, 1982, 423 p.
- LYRA, F.J.M. Simulação numérica de uma central fotovoltaica interligada com a rede de energia elétrica. Recife, 1992. 236p. (Dissertação de Mestrado – Departamento de Energia Nuclear / UFPE).
- MATLAB The Language of Technical Computing. versão 6.5. [S.I.]: Math Works, Inc, 2002. 2 CD-ROM.
- O' GALLAGHER, J.J.; SNAIL, K.; WINSTON, R. A new evacuated CPC collector tube. *Solar Energy*, n. 6, v. 29, p. 575-577. 1982.
- PINAZO, J.M.; CAÑADA, J.; ARAGO, F. Analysis of the incidence angle of the beam radiation on CPC. *Solar Energy*, n. 3, v. 49, p. 175-179. 1992.
- RABL, A. Optical and thermal properties of compound parabolic concentrator. *Solar Energy*, v. 18, p. 497-511. 1976a.
- RABL, A. Solar concentrator with maximal concentration for cylindrical absorbers. *Applied Optics*, n. 7, v. 15. 1976b.
- RABL, A. Yearly average performance of the principal solar collector. *Solar Energy*. v. 27, p. 215. 1981.
- RABL, A. *Active Solar Collector and Their Applications*. New York, Oxford University Press, 1985. 503p.
- RABL, A.; GOODMAN, N.B.; WINSTON, R. *Practical design considerations for CPC solar collectors*. *Solar Energy*, v. 22, p. 373-381. 1979.
- RABL, A.; O'GALLAGHER, J.; WINSTON, R. *Design and test of non-evacuated solar collectors with compound parabolic concentrators*. *Solar Energy*, v. 25, p. 335-351. 1980.
- SILVA, G.C.B. Um estudo experimental dos mecanismos de perdas térmicas em concentradores parabólicos compostos não-evacuados com absorvedor cilíndrico. Recife, 1994. 72p. (Dissertação de Mestrado – Departamento de Energia Nuclear / UFPE)

SPIRITO, P.; VITALE, G. Course on photovoltaic solar devices. *Anais*, Itália, Instituto Eletrotécnico - University of Nápoles .1982.

TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N.; BARBOSA, E.M. Previsão do desempenho térmico de um coletor mediante testes noturnos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 10., Rio de Janeiro, 1989. *Anais*. Rio de Janeiro, UFRJ, 1989.

TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N.; MOSZKOWICZ, M.; LYRA, F.J.M.; NOGUEIRA, A.A.M.B.; GROSSI GALLEGOS, H. *CD-ROM Atlas Solarimétrico do Brasil*, ISBN 85-7315-188-9, UFPE, Brasil, .2003.

WELFORD, W.T.; WINSTON, R. *The optics of non-imaging concentrators*. New York, Academic Press, 1978. 199p.

WINSTON, R. Selected papers on nonimaging optics. *Annual report*, New York, SPIE Press, p.650. 1995.

