



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**"ANÁLISE TÉRMICA DE UM COLETOR SOLAR
COMPOSTO DE CAVIDADES V PARA AQUECIMENTO DE
ÁGUA"**

MICHEL FÁBIO DE SOUZA MOREIRA

Belo Horizonte, 9 de Março de 2009.

MICHEL FÁBIO DE SOUZA MOREIRA

**"ANÁLISE TÉRMICA DE UM COLETOR SOLAR
COMPOSTO DE CAVIDADES V PARA AQUECIMENTO DE
ÁGUA"**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Calor e fluidos.

Orientador: Prof. Márcio Fonte-Boa Cortez.

(Universidade Federal de Minas Gerais)

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2009



Universidade Federal de Minas Gerais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax.: +55 31 3443-3783

www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**"ANÁLISE TÉRMICA DE UM COLETOR SOLAR
COMPOSTO DE CAVIDADES V PARA AQUECIMENTO DE
ÁGUA"**

MICHEL FÁBIO DE SOUZA MOREIRA

Dissertação defendida e aprovada em __, de ____ de 2009, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Calor e Fluidos".

PROF. MÁRCIO FONTE BOA CORTEZ

Orientador – Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG

PROF. PAULO CÉSAR DA COSTA PINHEIRO

Examinador – Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG

PROF. ANDRÉ GUIMARÃES FERREIRA

Examinador – Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET/MG

PROFA. CRISTIANA BRASIL MAIA

Examinadora – Doutora, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC/MG

À minha linda esposa e à nossa jornada pela vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, Senhor e dono de todo o universo. Sem Ele eu não existiria! Agradeço a minha família que sempre me apoiou nas dificuldades, em especial a minha mãe (Ana Maria) exemplo de luta e coragem, que me apoiou em todos os momentos sempre acreditando na concretização deste sonho.

A meu pai (Antônio), exemplo de vida e perseverança. Um grande experimentalista!

A minha tia (Cidinha) pelo amor e atenção.

Aos meus irmãos (Leonardo e Juninho).

A minha ilustre esposa (Camila), que muito me ajudou nesta conquista.

A todos os amigos que fiz no PPGMEC, exemplos de luta e coragem.

Agradeço especialmente ao Professor Dr. Márcio Fonte-Boa Cortez por toda atenção e apoio na elaboração deste trabalho. Muito obrigado Professor!

Agradeço a todos os funcionários da Pós – Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que intercederam por mim contribuindo de alguma forma para a realização deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Introdução e objetivos	1
1.2 Estrutura do trabalho.....	2
2 AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA.....	4
2.1 Considerações iniciais.....	4
2.2 Aquecedor solar de água doméstico.....	5
2.3 Coletor solar de placa plana.....	6
2.4 Coletor solar composto de cavidades V.....	9
3 BREVE HISTÓRICO SOBRE AS CAVIDADES V.....	11
3.1 Concentradores não-formadores de imagem.....	11
3.2. Cavidades tipo V.....	18
4 MODELAGEM MATEMÁTICA DO COLETOR SOLAR COMPOSTO DE CAVIDADES V.....	22
4.1 Cavidades tipo V com absorvedor cilíndrico.....	22
4.1.1 Aspectos gerais da geometria e da ótica das cavidades tipo V.....	24
4.1.2 Propriedades gerais das funções $P_s(\theta_i)$	34
4.1.2.1 Estado completo – contribuição do espelho direito.....	35
4.1.2.2 Estado ascendente – contribuição do espelho direito.....	36
4.1.2.3 Estado descendente – contribuição do espelho direito.....	38
4.1.2.4 Contribuição do espelho esquerdo.....	40
4.1.2.5 Radiação rejeitada pela cavidade – contribuição do espelho direito	40
4.2 Aplicação das soluções analíticas de $P_s(\theta_i)$ para o cálculo das propriedades óticas das cavidades tipo V.....	42
4.3 Análise térmica do coletor solar de cavidades tipo V para aquecimento de água.....	44
4.3.1 Perdas térmicas associadas ao coletor e a energia útil.....	44
5 METODOLOGIA.....	51
5.1 Considerações iniciais.....	51
5.2 Propriedades óticas das cavidades tipo V.....	51

5.3 Avaliação da radiação solar incidente sobre o coletor.....	54
5.4 Comportamento térmico do coletor solar composto por cavidades V.....	60
5.5 Implementação do modelo matemático.....	62
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
6.1 Considerações iniciais.....	65
6.2 Propriedades óticas das cavidades V.....	65
6.2.1 Análise prévia da configuração da cavidade tipo V.....	65
6.2.2 Eficiência ótica.....	67
6.3 Análise térmica do coletor composto por cavidades V	71
6.3.1 Curva de desempenho térmico.....	71
6.3.2 Temperatura de saída da água.....	75
6.3.3 Desempenho térmico dos coletores com $C=2,0$ e $\psi=41^\circ$ e com $C=4,4$ e $\psi=25^\circ$	82
6.4 Estimativas de custos dos coletores com cavidades V.....	87
6.5 Considerações finais.....	90
7 CONCLUSÕES.....	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94
APÊNDICE A.....	100
APÊNDICE B.....	103
APÊNDICE C.....	110
LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS E QUADROS.....	vi
LISTA DE GRÁFICOS.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	x
NOMENCLATURA.....	xi
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Elementos constituintes do coletor solar plano “placa tubos”.....	7
FIGURA 2.2 – Aquecedor solar de água operando em circulação natural.....	8
FIGURA 2.3 – Detalhes da Cavidade V com absorvedor tubular cilíndrico.....	9
FIGURA 2.4 – Desenho esquemático do coletor solar composto por cavidades tipo V.....	9
FIGURA 3.1 – Disposição geométrica do conjunto fonte, cavidade e receptor.....	12
FIGURA 3.2 – Concentrador Elíptico Composto (CEC) com fonte e luz plana.....	13
FIGURA 3.3 – Concentrador hiperbólico composto (CHC) com fonte e luz plana.....	14
FIGURA 3.4 – Lente combinada com concentrador secundário tipo CEC.....	15
FIGURA 3.5 – Combinação lente e concentrador secundário tipo CHC.....	15
FIGURA 3.6 – Cavidade tipo V como caso particular de concentrador CHC ($\overline{RERD} = \overline{RDFD}$).....	16
FIGURA 3.7 – Função de aceitação angular de concentradores parabólicos compostos.....	17
FIGURA 3.8 – Cavidade V associada a absorvedores cilíndricos próximos ao vértice, imagens à direita e a esquerda.....	20
FIGURA 3.9 – Comportamento da radiação solar incidente na cavidade V.....	20
FIGURA 3.10 – Representação do prolongamento dos raios refletidos.....	21
FIGURA 4.1 – Representação esquemática da cavidade V.....	22
FIGURA 4.2 – Cavidade V com absorvedor tubular cilíndrico.....	23
FIGURA 4.3 – Esquema do coletor solar composto por cavidades V.....	23
FIGURA 4.4 – Ilustração dos elementos fundamentais da cavidade V.....	25
FIGURA 4.5 – Ângulos característicos α_2 e β_0	27
FIGURA 4.6 – Ângulos característicos δ_2 e γ_3	27
FIGURA 4.7 – Representação dos dois estados (ascendente e completo) para $k = 1$	29
FIGURA 4.8 – Representação do estado descendente para $k = 1$	30
FIGURA 4.9 – Estados ascendentes e descendentes de iluminação da abertura para 4 reflexões reais da radiação rejeitada.....	31

FIGURA 4.10 – Procedimento gráfico para determinar os ângulos α_{N+1} e β_{N-1}	32
FIGURA 4.11 – Determinação dos modos de maior ordem da radiação rejeitada, $\alpha_3 > \delta_2$, e $M=4$	33
FIGURA 4.12 – Determinação dos modos de maior ordem da radiação rejeitada, $\alpha_3 < \delta_2$ e $M=5$	33
FIGURA 4.13 – Ilustração da distância mínima entre o tubo absorvedor e as superfícies refletoras.....	36
FIGURA 4.14 – Circuito térmico do coletor solar composto por cavidades tipo V.....	46
FIGURA 4.15 – Tubo absorvedor e circuito térmico correspondente, com	
$R_1 = \frac{A_a \ln\left(\frac{r}{r_o}\right)}{2\pi k_a L} \text{ e } R_2 = \frac{A_a}{h_i A_i}$	49
FIGURA 5.1-Etapas de implementação do modelo matemático do coletor composto por cavidades tipo V.....	63
FIGURA 6.1 – Influência de ψ na geometria da cavidade – diâmetro e razão de concentração fixados.....	66
FIGURA 6.2 - Comparação entre coletores utilizando cavidades V que podem apresentar relação custo benefício favorável e coletores comerciais.....	66
FIGURA 6.3 – Radiação que é rejeitada e que intercepta o absorvedor pela extremidade da abertura para ângulos de incidência crescentes.....	70
FIGURA 6.4 – Comportamento da radiação aceita e rejeitada com variação da razão de concentração ($\psi = 30^\circ$ e o raio = 7,5 mm).....	71
FIGURA A.1 – Esquema de obtenção do ângulo característico α_k	100
FIGURA A.2 – Esquema de obtenção do ângulo característico β_k	101
FIGURA A.3 – Esquema de obtenção do ângulo característico β_k	102
FIGURA B.1 – Esquema de uma cavidade V com absorvedor iluminado no estado considerado completo.....	103

FIGURA B.2 Obtenção do domínio angular $(-\zeta, \zeta)$	104
FIGURA B.3 Obtenção do parâmetro y	105
FIGURA B.4 Ilustração do estado ascendente representado pelo primeiro grupo, com $k = 1$	106
FIGURA B.5 – Estado ascendente, segundo grupo, dedução da EQ. 4.21.....	107
FIGURA B.6 – Comprimento da radiação rejeitada que realiza 3 reflexões reais no interior da cavidade V.....	108
FIGURA B.7 – Comprimento da radiação rejeitada que realiza 4 reflexões reais no interior da cavidade V.....	109

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 2.1 – Tipos de coletores solares térmicos e faixas de temperatura de trabalho.....	5
TABELA 5.1 - Dia médio recomendado para o mês e os valores dos dias do ano para cada mês.....	53
TABELA 5.2 - Planilha de Insolação para Belo Horizonte.....	54
TABELA 5.3 - Insolação horária média mensal no plano horizontal para a cidade de Belo Horizonte.....	57
TABELA 5.4 – Inclinação do coletor para os dias de equinócio e solstício.....	58
TABELA 5.5 - Declinação para os dias de equinócio e solstício do ano de 2007.....	58
TABELA 5.6 - Insolação horária média mensal no plano do coletor com inclinações ótimas para os equinócios e solstícios para a cidade de Belo Horizonte.....	59
TABELA 5.7 - Insolação horária média mensal no plano do coletor com inclinação igual a 30° referente à cidade de Belo Horizonte.....	60
TABELA 5.8 - Temperatura de entrada da água no coletor, T_{entrada} , e ângulo horário, ω	62
TABELA 6.1 - Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=2,0$, $\psi= 41^\circ$, $\dot{m} = 0,02$ kg/s, coletor constituído de 21 cavidades).....	76
TABELA 6.2 - Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=2,0$, $\psi= 41^\circ$, $\dot{m} = 0,01$ kg/s, coletor constituído de 21 cavidades).....	77
TABELA 6.3 - Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=2,8$, $\psi= 41^\circ$, $\dot{m} = 0,02$ kg/s, coletor constituído de 15 cavidades).....	78
TABELA 6.4 - Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=2,8$, $\psi= 41^\circ$, $\dot{m} = 0,01$ kg/s, coletor constituído de 15 cavidades).....	78

TABELA 6.5 - Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=3,6$, $\psi= 41^\circ$, $\dot{m} = 0,02$ kg/s, coletor constituído de 12 cavidades).....	79
TABELA 6.6 - Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=3,6$, $\psi= 41^\circ$, $\dot{m} = 0,01$ kg/s, coletor constituído de 11 cavidades).....	79
TABELA 6.7 - Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=4,0$, $\psi= 41^\circ$, $\dot{m} = 0,02$ kg/s, coletor constituído de 11 cavidades).....	80
TABELA 6.8 - Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=4,0$, $\psi= 41^\circ$, $\dot{m} = 0,01$ kg/s, coletor constituído de 11 cavidades).....	80
TABELA 6.9 - Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=4,4$, $\psi= 25^\circ$, $\dot{m} = 0,02$ kg/s, coletor constituído de 10 cavidades).....	81
TABELA 6.10 - Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=4,4$, $\psi= 25^\circ$, $\dot{m} = 0,01$ kg/s, coletor constituído de 10 cavidades).....	81
TABELA 6.11 - Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=2,0$, $\psi= 41^\circ$, $\dot{m} = 0,02$ kg/s, $\mu = 30^\circ$ e coletor constituído de 21 cavidades V).....	84
TABELA 6.12 - Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=2,0$, $\psi= 41^\circ$, $\dot{m} = 0,01$ kg/s, $\mu = 30^\circ$ e coletor constituído de 21 cavidades).....	85
TABELA 6.13 - Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=4,4$, $\psi= 25^\circ$, $\dot{m} = 0,02$ kg/s, coletor constituído de 10 cavidades).....	86
TABELA 6.14 - Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=4,4$, $\psi= 25^\circ$, $\dot{m} = 0,01$ kg/s, coletor constituído de 10 cavidades).....	87
TABELA 6.15 - Tabela análise de custo $C = 2,0$, número de cavidades igual a 21.....	88

TABELA 6.16 - Tabela análise de custo $C = 2,8$ número de cavidades igual a 15.....	88
TABELA 6.17 - Tabela análise de custo $C = 3,6$ número de cavidades igual a 11	89
TABELA 6.18 - Tabela análise de custo $C = 4,0$ número de cavidades igual a 11.....	89
TABELA 6.19 - Tabela análise de custo $C = 4,4$ número de cavidades igual a 10.....	89
TABELA C.1 Propriedades físicas e óticas dos materiais utilizados no coletor solar composto de cavidades tipo V.....	110

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 6.1 – Eficiência ótica da radiação direta para $C = 2,0$	67
GRÁFICO 6.2 – Eficiência ótica da radiação direta para $C = 2,8$	68
GRÁFICO 6.3 – Eficiência ótica da radiação direta para $C = 3,6$	68
GRÁFICO 6.4 – Eficiência ótica da radiação direta para $C = 4,0$	69
GRÁFICO 6.5 – Eficiência ótica da radiação direta para $C = 4,4$	69
GRÁFICO 6.6 – Curva de desempenho do coletor constituído de 21 cavidades tipo V, altura igual a 2,8 cm e largura dos refletores igual 3,5 cm.....	72
GRÁFICO 6.7 – Curva de desempenho do coletor constituído de 15 cavidades tipo V, altura igual a 3,8 cm e largura dos refletores igual 5,0 cm.....	73
GRÁFICO 6.8 – Curva de desempenho do coletor constituído de 12 cavidades tipo V, altura igual a 4,7 cm e largura dos refletores igual 6,2 cm.....	73
GRÁFICO 6.9 – Curva de desempenho do coletor constituído de 11 cavidades tipo V, altura igual a 5,2 cm e largura dos refletores igual 6,9 cm.....	79
GRÁFICO 6.10 – Curva de desempenho do coletor constituído de 10 cavidades tipo V, altura igual a 11,0 cm e largura dos refletores igual 12,3 cm.....	79
GRÁFICO 6.11 – Curva de desempenho do coletor com cavidades com $C = 2,0$, $\psi = 41^\circ$, para inclinação de 30° , $\dot{m} = 0,02$ kg/s - Cidade de Belo Horizonte.....	83
GRÁFICO 6.12 – Curva de desempenho do coletor com cavidades com $C = 4,4$, $\psi = 25^\circ$, para inclinação de 30° , $\dot{m} = 0,02$ kg/s - Cidade de Belo Horizonte.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT –Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASHRAE-American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers

CEC - Concentrador elíptico composto

CHC - Concentrador hiperbólico composto

CPC - Concentrador parabólico composto

EES - Engineering Equation Solver

NBR –Norma Brasileira Regulamentada

PPGMEC - Programa de Pós – Graduação em Engenharia Mecânica

NOMENCLATURA

Letras Latinas

a	Distância mínima entre o tubo absorvedor e a superfície refletora [m]
A	Comprimento da abertura da cavidade [m]
A_{col}	Área do coletor [m ²]
A_i	Área interna do tubo absorvedor [m ²]
$\acute{A}rea_a$	Área da cobertura do tubo absorvedor [m ²]
$\acute{A}rea_c$	Área da cobertura do coletor [m ²]
$A_s(\theta_i)$	Fração de A , na qual radiação solar incidente com θ_i pertence ao modo de reflexão s [m]
C	Razão de concentração [adimensional]
c_p	Calor específico [kJ/kg.°C]
D_H	Diâmetro hidráulico [m]
E_{Acab}	Coefficientes de troca radiativa entre abertura/absorvedor [adimensional]
E_{AA}	Coefficientes de troca radiativa entre abertura/Abertura [adimensional]
$F(\theta_i)$	Função de aceitação angular [adimensional]
$h_{a,c}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção entre o tubo absorvedor e a cobertura [W/m ² .°C]
$h_{c,amb}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção entre a cobertura e o ambiente [W/m ² .°C]
h_i	Coefficiente convectivo relativo à transmissão de calor entre o tubo absorvedor e a água no coletor solar composto por cavidades V [W/m ² K]
H	Radiação solar diária média mensal [MJ/m ²]
H_b	Componente direta da radiação solar diária média mensal [MJ/m ²]
H_d	Componente difusa da radiação solar diária média mensal [MJ/m ²]

H_0	Radiação solar extraterrestre diária média mensal [MJ/m ²]
I	Insolação total horária média mensal no plano horizontal [MJ/m ²]
I_b	Componente direta da insolação total horária média mensal no plano horizontal [MJ/m ²]
I_d	Componente difusa da insolação total horária média mensal no plano horizontal [MJ/m ²]
I_{incl}	Insolação total horária média mensal no plano inclinado do coletor [MJ/m ²]
$I_{b;incl}$	Componente direta da insolação total horária média mensal no plano inclinado do coletor [MJ/m ²]
$I_{d;incl}$	Componente difusa da insolação total horária média mensal no plano inclinado do coletor [MJ/m ²]
I_T	Radiação total incidente na abertura do coletor, plano inclinado [W/m ²]
k	Número de reflexões do modo de reflexão k para radiação solar aceita [adimensional]
k_a	Condutividade térmica do material que constitui o tubo absorvedor [W/m.K]
k_f	Condutividade térmica do fluido [W/m.K]
K_t	Índice de transparência da atmosfera mensal [adimensional]
l	Linha imaginária que simultaneamente paralela ao diâmetro do tubo absorvedor e abertura da cavidade V [m]
L	Comprimento do coletor composto por cavidades tipo V [m]
m	Parâmetro relativo a y [adimensional]
\dot{m}	Vazão mássica de água no coletor [kg/s]
$M(\theta_i)$	Número máximo de reflexões da radiação solar na cavidade em função do ângulo θ_i [adimensional]
n	Número de reflexões da radiação solar rejeitada no interior da cavidade V [adimensional]
\bar{n}	Número médio de reflexões para os raios incidentes na abertura com metade do ângulo de aceite [adimensional]

$n(\theta_i)$	Número médio de reflexões no interior da cavidade pela radiação incidente com o ângulo θ_i que atinge ou não o absorvedor [adimensional]
$n_d(\theta_i)$	Número médio de reflexões da radiação difusa dentro da cavidade V que interceptam ou não o absorvedor [adimensional]
$n_{dN}(\theta_i)$	Número médio de reflexões da radiação difusa que efetivamente atingem o absorvedor [adimensional]
$n_N(\theta_i)$	Número médio de reflexões que efetivamente atingem o absorvedor [adimensional]
N	Modo de reflexão de maior ordem para a radiação aceita pela cavidade V [adimensional]
Nu	Número de Nusselt [adimensional]
$P_s(\theta_i)$	Função associada ao modo de reflexão (s), para radiação solar aceita ou rejeitada, com ângulo de incidência θ_i [adimensional]
q_b	Componente direta do fluxo de radiação solar [W/m^2]
$q_{b,a}$	Radiação solar direta absorvida pelo tubo absorvedor [W/m^2]
$q_{b,c}$	Radiação solar direta absorvida pela cobertura [W/m^2]
$q_{CONV_{a,c}}$	Troca de calor por convecção entre o tubo absorvedor e a cobertura [W/m^2]
$q_{CONV_{c,amb}}$	Troca de calor por convecção entre a cobertura e o ambiente [W/m^2]
q_d	Componente direta do fluxo de radiação solar [W/m^2]
$q_{d,c}$	Radiação solar difusa absorvida pela cobertura [W/m^2]
$q_{RAD_{a,c}}$	Radiação solar trocada entre o tubo absorvedor e a cobertura [W/m^2]
$q_{RAD_{c,céu}}$	Radiação solar trocada entre o tubo a cobertura e céu [W/m^2]
$Q_{\acute{U}TIL}$	Quantidade de calor que pode ser extraída pelo fluido que escoar no interior dos tubos absorvedores [W]
r	Raio externo do tubo absorvedor [m]

r_o	Raio interno do tubo absorvedor [m]
R_b	Parâmetro para obtenção da componente direta da insolação no plano inclinado do coletor [adimensional]
s	Número de reflexões da radiação aceita ou rejeitada [adimensional]
T_a	Temperatura do tubo absorvedor, ajustada conforme a equação [K] ou [°C]
T_{amb}	Temperatura do ambiente, ajustada conforme a equação [K] ou [°C]
T_c	Temperatura da cobertura, ajustada conforme a equação [K] ou [°C]
$T_{céu}$	Temperatura do céu, que pode ser relacionada à temperatura ambiente [K]
$T_{saída}$	Temperatura de saída da água do coletor solar composto por cavidades V [°C]
$T_{entrada}$	Temperatura de entrada da água no coletor solar composto por cavidades V [°C]
U_{alf}	Coeficiente global que relaciona a condução através da parede do tubo absorvedor e a convecção para o fluido que escoar no interior deste absorvedor [W/m ² .K]
V	Velocidade do vento [m/s]
y	Parâmetro que descreve a distância relativa a r entre o tubo absorvedor e a superfície refletora em uma direção paralela à abertura da cavidade V [adimensional]
y	Número de horas de brilho solar real [h]
Y	Número de horas de brilho solar máximo [h]

Letras Gregas

α	Absorvidade [adimensional]
α_k	Menor ângulo de incidência para o qual a radiação é aceita pela cavidade (atinge o absorvedor) no modo de reflexão k [°]
β_k	Maior ângulo de incidência, em módulo, para o qual a radiação é aceita pela cavidade no modo de reflexão k [°]
γ_k	Menor ângulo de incidência, em módulo, em que a radiação é rejeitada pela cavidade (retorna a atmosfera) após realizar $2k$ reflexões [°]

δ_k	Menor ângulo de incidência, em módulo, em que a radiação é rejeitada pela cavidade após realizar $2k+1$ reflexões [°]
ε_a	Emissividade do material que compõe o tubo absorvedor, no caso cobre [adimensional]
ε_c	Emissividade do material que compõe a cobertura, no caso vidro [adimensional]
θ_m	Ângulo da incidência da radiação sobre o absorvedor plano [°]
θ_M	Ângulo da incidência da radiação na abertura do CEC [°]
θ_i	Ângulo da incidência da radiação na abertura da cavidade V [°]
ρ	Refletividade [adimensional]
$\eta(\theta_i)$	Eficiência ótica da radiação [adimensional]
$\eta_{otb}(\theta_i)$	Eficiência ótica da radiação direta incidente com θ_i [adimensional]
$\eta_{otd}(\theta_i)$	Eficiência ótica da radiação difusa incidente com θ_i [adimensional]
$\eta'_{otb}(\theta_i)$	Eficiência ótica aproximada para radiação direta incidente com θ_i [adimensional]
$\eta'_{otd}(\theta_i)$	Eficiência ótica aproximada para radiação difusa incidente com θ_i [adimensional]
τ	Transmissividade [adimensional]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, igual a $5,67 \times 10^{-8} \text{ W / m} \cdot \text{K}^4$
ψ	Semi-ângulo do vértice [°]
ζ	Ângulo limite de incidência da radiação solar que pertencente ao modo $k = 0$, para o tubo absorvedor distante das superfícies refletoras [°]
μ	Inclinação do coletor [°]
ϕ	Latitude [°]
ω	Ângulo horário [°]
ω_s	Deslocamento angular do sol em seu poente [°]
λ	Azimute de superfície [°]
ν	Declinação [°]

Subscritos

<i>a</i>	Denota tubo absorvedor
<i>A</i>	Denota comprimento da abertura
<i>amb</i>	Denota o ambiente externo ao coletor, o ambiente propriamente dito
<i>b</i>	Denota componente direta da radiação solar
<i>c</i>	Denota a cobertura do coletor
<i>cab</i>	Denota comprimento o radial do tubo absorvedor
céu	Denota o céu (ambiente)
<i>col</i>	Denota coletor
CONV	Denota convecção
<i>d</i>	Denota componente difusa da radiação solar
<i>esp</i>	Denota espelho
<i>f</i>	Denota fluido
<i>H</i>	Denota hidráulico
<i>k</i>	Denota o número de reflexões <i>k</i> pela radiação solar aceita pela cavidade V
RAD	Denota radiação
<i>s</i>	Denota o número de reflexões <i>s</i> realizadas pela radiação solar aceita ou rejeitada pela cavidade
<i>otb</i>	Denota eficiência ótica para radiação direta
<i>otd</i>	Denota eficiência ótica para radiação difusa
<i>T</i>	Denota total

Sobrescritos

<i>D</i>	Referencia o espelho direito
<i>E</i>	Referencia o espelho esquerdo
-	Denota propriedades médias ou é relativo à radiação difusa

RESUMO

O aquecimento solar de água é realizado, no Brasil, por meio de aquecedores solares compostos por coletores solares planos do tipo placa-e-tubos, dispositivos estes que operam em posição estacionária e não requerem rastreamento do sol. Como uma alternativa aos coletores solares planos convencionais, propõe-se um coletor composto por várias cavidades concentradoras formadas, cada uma, por duas superfícies refletoras planas associadas em V, ou em outras palavras, equivalente a uma calha triangular. Próximo ao vértice de cada cavidade concentradora é fixado um tubo absorvedor, para escoamento do fluido a ser aquecido. A interconexão dos tubos absorvedores forma uma grade tubular similar à existente em coletores solares do tipo placa e tubo. As cavidades V com os tubos absorvedores são dispostas em paralelo no interior uma caixa prismática, que possui uma de suas faces constituída por uma cobertura de vidro voltada para a incidência da radiação solar. Busca-se uma análise de desempenho térmico destes dispositivos operando estacionariamente e sem rastreamento da posição do sol. Um modelo matemático para a simulação computacional do desempenho ótico e térmico destes dispositivos concentradores foi elaborado, e sua implementação foi realizada através do software EES (Engineering Equation Solver). A eficiência ótica das cavidades V com absorvedores cilíndricos é calculada a partir da adaptação da metodologia utilizada por Fraidenraich (1994), proposta por Hollands (1971) para cavidades V com absorvedores planos. A análise térmica do coletor proposto baseou-se na metodologia aplicada a CPC (Concentrador Parabólico Composto) por Hsieh (1981) e Leão (1989). Resultados relativos ao desempenho térmico das cavidades V sugerem que estas configurações não são competitivas, técnica e economicamente, com os coletores planos convencionais. Embora algumas configurações geométricas apresentassem eficiências térmicas próximas às dos coletores planos convencionais, os custos unitários elevados, inviabilizam, num primeiro momento, o uso de coletores V para o aquecimento de água doméstico.

Palavras chave: coletor solar, cavidades V, absorvedor cilíndrico, aquecimento solar de água, simulação computacional.

ABSTRACT

The solar water heating is carried through, in Brazil, by means of solar heaters compound for collectors flat plate of the type plate-and-pipes, devices that operate in stationary position and they do not require tracking of the sun. A compound collector for some formed V-trough concentrators can be an alternative to the conventional solar collectors flat plate. This compound collector for V-trough is considered, each one, for side-walls which are specularly reflecting surfaces associates in V (equivalent to a triangular gutter). Next to the vertex to each V-trough concentrators an absorber tube is fixed, for flow of the fluid to be heated. Interconnection of the absorbers tubes forms a similar tubular network existing in solar collectors of the type the plate and pipe. V-trough concentrators with the absorbers tubes are made use in series in the interior a prismatic box, which have one of its faces consisting by a glass covering and directed toward incidence of the solar radiation. An analysis of thermal performance of these devices operating stationary and without tracking of the sun is researched. A mathematical model for the computational simulation of the optical and thermal performance of these concentrative devices is elaborated, whose implementation was carried through software EES (Engineering Equation Solver). The efficiency optics of V-trough concentrators with cylindrical absorbers is calculated from the adaptation of the methodology used for Fraidenraich (1994), proposal for Hollands (1971) for V-trough cavities with plain absorbers. The thermal analysis of the considered collector was based on the applied methodology the CPC for Hsieh (1981) and Leão (1989). Relative results to the thermal performance of V-trough concentrators suggest that these configurations are not competitive, technique and economically, with the conventional plain collectors. Although some geometric configurations presented next thermal efficiencies to the conventional plain collectors, it's raised unitary costs, however, make impracticable, at a first moment, for the domestic water heating.

Keywords: solar collector, V-trough concentrators, cylindrical absorber, solar water heating, computational simulation.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Introdução e objetivos

A busca constante por mecanismos mais eficientes e competitivos para utilização de energia renovável fomenta o desenvolvimento e a melhoria de tecnologias. O aquecimento de água por energia solar para uso doméstico também tem sido alvo de pesquisas que visam à melhoria de sistemas existentes e a criação de novos equipamentos.

Normalmente, o aquecimento solar de água se faz mediante o emprego de coletores solares *planos, do tipo placa e tubos*. Nestes coletores, a placa tem por função absorver radiação solar e transferir calor por condução térmica (*efeito aleta*) a tubos que conduzem a água a ser aquecida. Por operarem com baixos níveis de temperatura, os coletores planos são adequados para esta aplicação. Aquecedores solares providos de coletores planos convencionais constituem sistemas amplamente difundidos e conhecidos pelas pessoas. Quando são exigidas temperaturas mais elevadas, os coletores solares *concentradores* são utilizados.

Os coletores concentradores são empregados em instalações que requerem temperaturas mais altas do que aquelas que podem ser obtidas com coletores planos, tais como usinas termossolares, motores a combustão externa (por exemplo: motor Stirling), na produção de vapor, fogões solares, entre outras (Garg, 1987; Duffie e Beckman, 1991). Dentre os diversos tipos de coletores concentradores encontram-se as cavidades tipo V. Estas cavidades fazem parte da família de concentradores de baixa razão de concentração (Fraidenraich 1994), sendo constituídas por duas paredes refletoras planas que se interceptam formando um ângulo. Na construção destas cavidades podem ser utilizados espelhos comuns (com refletividade superior a 0,8) amplamente disponíveis no mercado.

Uma questão que se apresenta neste trabalho refere-se à viabilidade técnica de um coletor solar constituído de cavidades V para o aquecimento de água, como uma alternativa aos coletores solares planos convencionais. Nesta configuração, um tubo para escoamento e aquecimento de água é disposto próximo ao vértice da cavidade em uma posição axial, sem contato físico com as superfícies refletoras. Cada tubo é interconectado, como os demais tubos das outras cavidades, a uma tubulação de entrada e a uma tubulação de saída. O conjunto de cavidades V é encerrado em uma carcaça, contendo no plano superior uma

cobertura transparente (eventualmente em vidro), para minimização das perdas térmicas convectivas.

É objetivo deste trabalho a realização uma análise de desempenho ótico e térmico do coletor composto de cavidades V, a partir da elaboração e implementação computacional de um modelo matemático. Dados meteorológicos disponíveis na literatura para a cidade de Belo Horizonte são adotados para efetivação da simulação computacional.

A motivação para a realização do presente trabalho deve-se a substituição do sistema de aletas utilizado no coletor plano do tipo placa e tubos por um mecanismo ótico (a cavidade concentradora tipo V). Este aparato ótico direciona a radiação por meio de reflexões entre as superfícies refletoras da cavidade V até o tubo absorvedor onde escoo o fluido a ser aquecido. Além disto, com a utilização de cavidades tipo V no coletor proposto não é necessário a presença de isolamento térmico de fundo como ocorre nos coletores planos do tipo placa e tubos.

1.2. Estrutura do trabalho

Inicialmente, é abordado o aquecimento solar de água, por coletores solares planos do tipo placa e tubos, bem como o coletor solar composto por cavidades tipo V (Capítulo 2). Em seguida, uma revisão bibliográfica é apresentada no Capítulo 3, destacando as cavidades tipo V. Nesta etapa do presente trabalho são apresentados aspectos importantes de estudos anteriores envolvendo tais cavidades, classe de concentradores de radiação solar à qual pertence a cavidade tipo V e suas propriedades óticas relevantes.

O modelo matemático do coletor solar composto por cavidades tipo V é apresentado no Capítulo 4. Este modelo consiste na formulação das propriedades óticas destas cavidades concentradoras, adaptadas para o aquecimento de fluidos, combinadas ao comportamento da radiação solar em seu interior. Na obtenção destas propriedades, as cavidades tipo V são associadas a tubos absorvedores próximos ao vértice e é realizada a análise térmica do coletor proposto.

A metodologia, Capítulo 5, consiste em apresentar, de forma breve, a implementação do modelo matemático desenvolvido, bem como as condições de avaliação de vários coletores solares em V, de forma a se obter uma configuração adequada para comparação com coletores solares planos disponíveis no comércio.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados para os diversos coletores solares compostos por cavidades V avaliados. São apresentados os resultados da eficiência ótica das cavidades tipo V, a temperatura de saída da água dos coletores, a eficiência térmica

instantânea dos coletores em V operando nas datas consideradas (equinócios e solstícios) e uma breve análise de custo. Com os resultados e discussões, é apontada uma configuração de um coletor solar associado a cavidades concentradoras tipo V que apresenta eficiência térmica comparável a coletores solares planos comerciais.

A conclusão do estudo é apresentada no Capítulo 7.

2. AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA

2.1. Considerações iniciais

Antes de se iniciar, neste capítulo, uma breve apresentação de sistemas solares de aquecimento de água convencionais, é interessante um comentário acerca dos tipos de coletores solares térmicos.

Os coletores solares constituem um tipo especial de trocador de calor que transforma a energia radiante em energia térmica (Duffie e Beckman, 1991). Os coletores solares são diferentes em vários aspectos dos trocadores de calor convencionais. Nestes coletores, a radiação oriunda de uma fonte distante é repassada ao fluido. Nos trocadores de calor convencionais, há uma transferência de calor entre dois fluidos, não tendo a radiação, muitas vezes, um papel relevante.

Diversos tipos de coletores solares e respectivas faixas de temperatura de trabalho são apresentados na TAB 2.1.

TABELA 2.1.

Tipos de coletores solares térmicos e faixas de temperatura de trabalho.

Movimento	Tipo de coletor	Tipo de absorvedor	Razão de concentração	Intervalo de temperatura de trabalho (°C)
Estacionário	Coletor de placa plana	placa	1	30-80
	Coletor de tubo evacuado	placa	1	50-200
	Coletor parabólico composto	tubos	1-5	60-240
Rastreio em um eixo	Refletor linear Fresnel	tubos	10-40	60-250
	Coletor de cavidade parabólica	tubos	15-45	60-300
	Coletor de cavidade cilíndrica	tubos	10-50	60-300
Rastreio em dois eixos	Refletor de disco parabólico	ponto	100-1000	100-500
	Coletor de campo (heliostato)	ponto	100-1500	150-2000

FONTE – Adaptado de Kalogirou (2004).

2.2. Aquecedor solar de água doméstico

O aquecimento solar de água para uso doméstico é realizado geralmente por coletores solares do tipo placa plana (Sprenger, 2007). Estes coletores são basicamente construídos por redes tubulares associadas a aletas, dispostos em uma caixa prismática que tem uma das faces constituída de material transparente (por exemplo: vidro) voltada para a atmosfera e um isolamento de fundo. Dos materiais que constituem estes aquecedores destacam-se tubos de alumínio ou cobre, devidamente trabalhados para tal aplicação. Os tubos

são pintados de forma a melhorar a absorção de radiação solar. Além dos coletores solares de placa plana fabricados a nível comercial, tem-se coletores solares desenvolvidos a partir de materiais recicláveis (por exemplo: coletor de garrafas pet) e de materiais alternativos, como o coletor inflável (Niemeyer, 2006).

A água aquecida por equipamentos mencionados no parágrafo anterior pode ser utilizada para higiene pessoal e limpeza de utensílios. Este procedimento é uma alternativa ambientalmente correta, além de favorecer a economia por parte dos usuários e não prejudicar a qualidade do banho (Sprenger, 2007). Este autor ainda ressalta que a redução de energia elétrica por residências contribui para o desenvolvimento socioeconômico de um país, porque a energia economizada pode ser utilizada na indústria favorecendo uma maior produção com conseqüente geração de empregos.

A ampla difusão do sistema de aquecimento de água por energia solar em residências pode contribuir para a redução de emissões atmosféricas por sistemas de aquecimento de água para uso residencial que utilizam combustíveis fósseis. E de acordo com Sprenger (2007), os gastos com construções de novas usinas hidrelétricas podem ser adiados e conseqüentemente as emissões atmosféricas por tais usinas podem ser repensadas e até minimizadas (Santos, 2000).

No Brasil, o aquecimento de água para banho por chuveiros elétricos é amplamente realizado. Este quadro deve ser mudado de forma a ampliar o aquecimento solar de água com restrição a sistemas elétricos de aquecimento a dias em que o coletor solar não tiver desempenho satisfatório. Estes procedimentos podem minimizar futuros problemas de ordem ambiental, como o aquecimento global.

2.3 Coletor solar de placa plana

Coletores solares de placa plana são geralmente aplicados ao aquecimento de água, aquecimento de residências, condicionamento de ar e a processos industriais que necessitam de fluidos a temperaturas moderadas (Duffie e Beckman, 1991). Requerem baixa manutenção e não necessitam de dispositivos para seguimento da trajetória solar. Além disto, estes coletores são, em geral, mais simples mecanicamente do que os coletores concentradores. Além disso, aproveitam tanto a radiação direta como a difusa.

Os coletores solares planos são compostos basicamente por superfície absorvedora, cobertura transparente e o isolamento térmico de fundo (FIG 2.1).

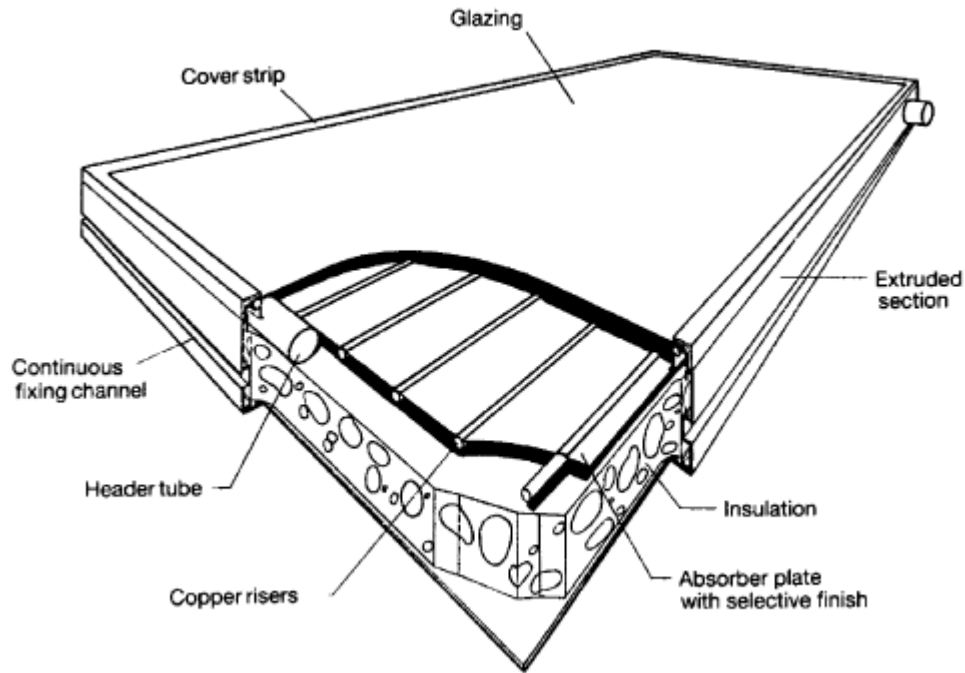


FIGURA 2.1 – Elementos constituintes do coletor solar plano “placa tubos”.

FONTE – Kalogirou (2004).

A placa absorvedora, ou conjunto de aletas, é responsável pela absorção e transferência de energia para o fluido. Para um melhor desempenho, estas superfícies são submetidas a tratamentos de forma a funcionarem como meios seletivos. A cobertura transparente é constituída geralmente por uma placa de vidro sobre a superfície absorvedora, a uma determinada distância, tendo por função reduzir perdas por radiação e convecção para a atmosfera. O isolamento de fundo é responsável pela redução das perdas térmicas por condução em direção ao fundo do coletor.

O coletor solar plano do tipo “placa-tubos” apresentado na FIG 2.1 constitui um componente do sistema de aquecimento de água. Além deste coletor, fazem parte o reservatório térmico e a caixa de água fria (FIG 2.2), que devem ser dispostos de maneira adequada para o funcionamento correto do sistema de aquecimento.

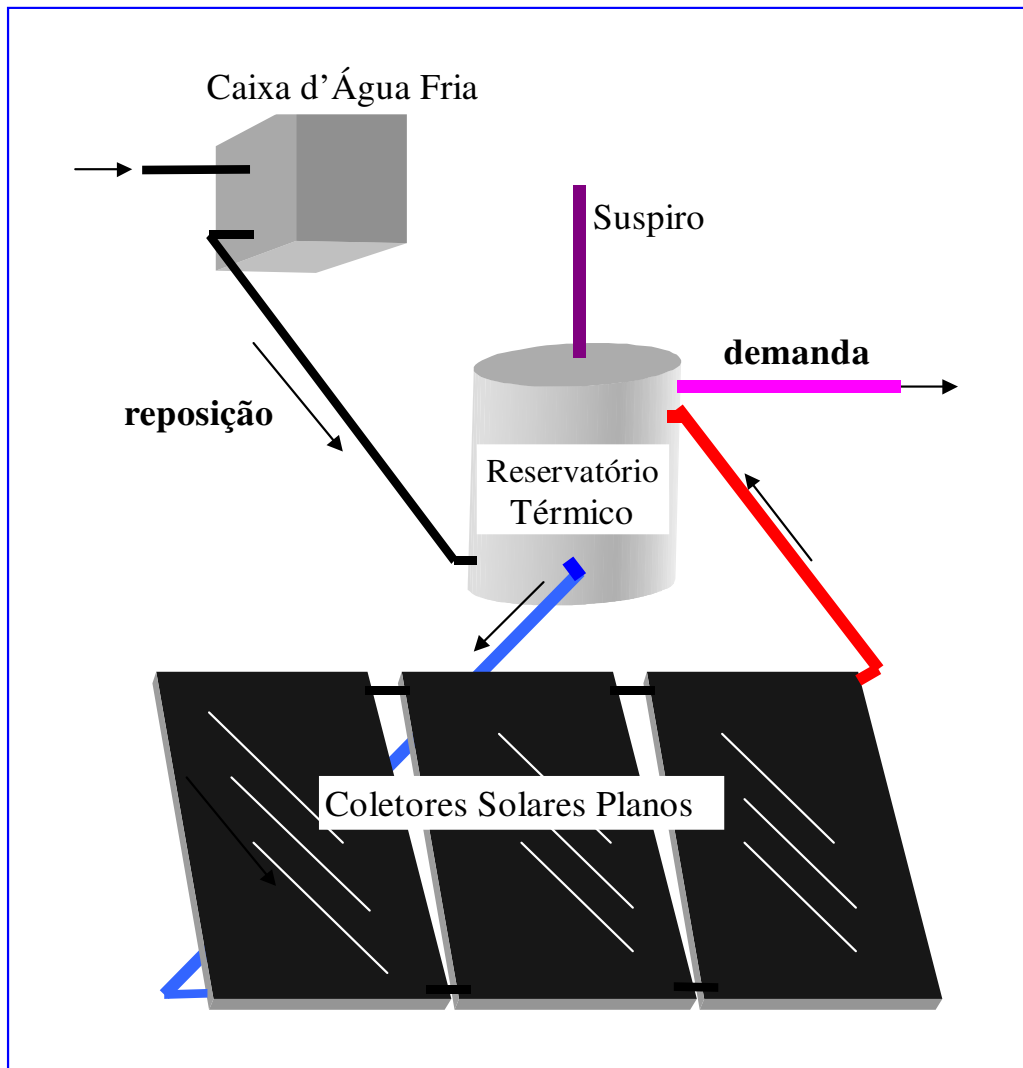


FIGURA 2.2 – Aquecedor solar de água operando em circulação natural.

Na FIG 2.2, a caixa de água fria recebe e armazena a água da concessionária local e entre outros destinos envia parte desta água para o reservatório térmico. Do reservatório, a água a ser aquecida é conduzida aos coletores. O ganho de energia pelo fluido promove o aumento da temperatura e redução da massa específica. Com isso o fluido mais denso empurra o menos denso pela saída superior dos coletores planos em direção ao topo do reservatório térmico (circulação natural). Este reservatório é responsável pela manutenção do nível de calor na água aquecida, proveniente dos coletores solares. A saída da água quente do reservatório, pronta para o uso, ocorre pelo topo deste recipiente. O suspiro (ou respiro) situado a partir do topo do reservatório térmico é responsável pelo controle da pressão no interior do reservatório, evitando deformações.

2.4 Coletor solar composto de cavidades V

O coletor solar concentrador, composto de cavidades tipo V para aquecimento de água doméstico, é relativamente simples. Este coletor compõe-se de cavidades tipo V inseridas em uma caixa prismática, que possui uma das faces coberta de material transparente voltada para a atmosfera. As cavidades V são constituídas por superfícies refletoras (por exemplo: espelho), como apresentado na FIG 2.3. Várias cavidades são empregadas na construção do coletor (FIG 2.4).

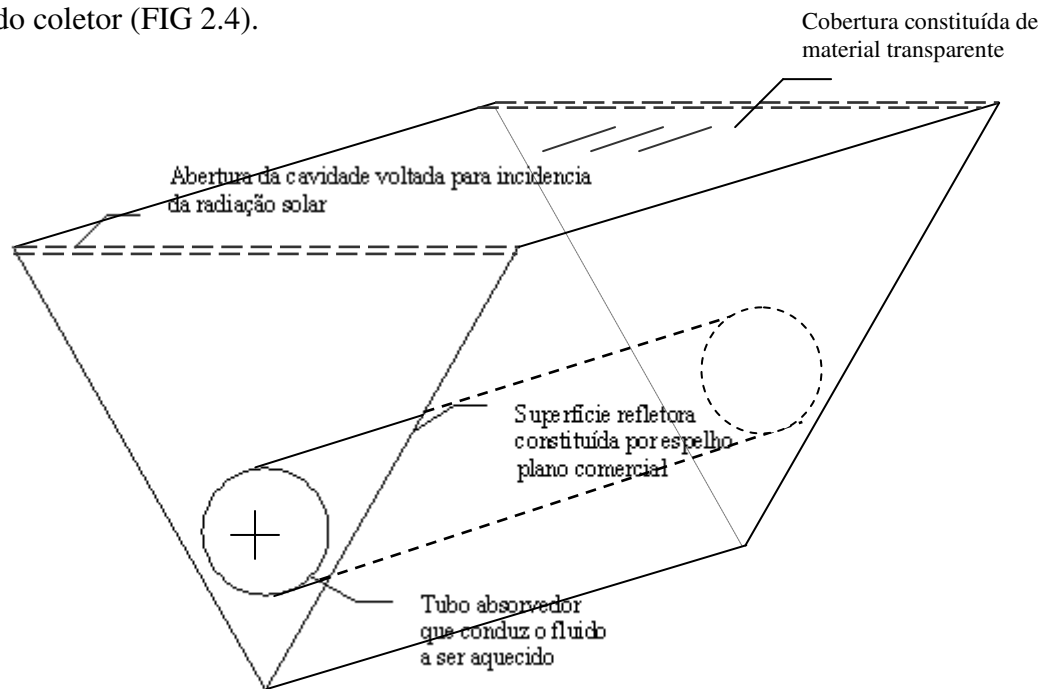


FIGURA 2.3 – Detalhes da Cavidade V com absorvedor tubular cilíndrico.

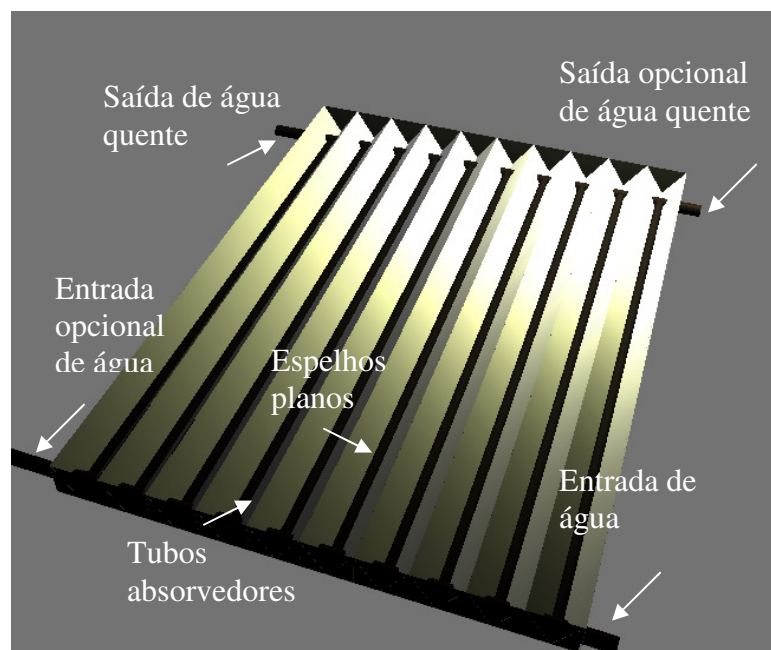


FIGURA 2.4 – Desenho esquemático do coletor solar composto por cavidades tipo V.

Cada cavidade tipo V contempla um tubo (denominado de absorvedor) posicionado próximo ao vértice e disposto na direção axial, cuja função é promover o escoamento de água a ser aquecida através do coletor. Todos os tubos absorvedores no coletor estão interconectados a uma tubulação de entrada e a uma tubulação de saída, normalmente de diâmetros maiores. O escoamento de água mais fria se distribui, a partir da tubulação de entrada, para os tubos absorvedores. A tubulação de saída coleta os escoamentos de água mais aquecida provenientes dos tubos absorvedores. Para aumento da absorção da radiação incidente sobre o tubo absorvedor, sua superfície recebe um recobrimento, normalmente, na forma de pintura com tinta de alta absorvidade à radiação solar.

Uma parcela da radiação solar incidente sobre o plano da cobertura transparente é transmitida para o interior, alcançando as superfícies refletoras. A radiação refletida por estas superfícies pode atingir o tubo absorvedor diretamente ou após múltiplas reflexões.

A complexidade ótica de funcionamento do coletor solar proposto neste trabalho está relacionada ao comportamento da radiação solar incidente desde a abertura da cavidade V até o absorvedor, ou até o retorno desta radiação para a atmosfera. Este comportamento é descrito em detalhes no Capítulo 4.

3. BREVE HISTÓRICO SOBRE AS CAVIDADES V

3.1 Concentradores não-formadores de imagem

O grupo dos concentradores não-formadores de imagem, chamados genericamente de concentradores parabólicos compostos, possui a propriedade de aceitar todos os raios luminosos incidentes em sua abertura, dentro de certo intervalo angular referido como intervalo de aceitação. A radiação que incide fora deste intervalo é rejeitada. Para um determinado ângulo de aceitação, há um limite teórico máximo para a concentração (Welford e Winston, 1989; Rabl, 1976, citados por Fraidenraich 1976). Estes concentradores possuem, geralmente, absorvedor plano, porém outras geometrias de absorvedor são também empregadas (Duffie e Beckman, 1991). Além disso, as paredes refletoras podem apresentar outras formas ou curvas diferentes de parábolas, como por exemplo, superfícies de perfil linear (Fraidenraich, 1994). Assim, de acordo com a geometria da superfície refletora há três categorias distintas de concentradores:

- Concentrador parabólico composto, CPC, com refletor parabólico;
- Concentradores elípticos compostos, CEC, com refletor elíptico;
- Concentrador hiperbólico composto, CHC, com refletor hiperbólico.

Deve-se observar que, embora os concentradores não formadores de imagem sejam classificados como concentradores parabólicos compostos, existem os concentradores parabólicos compostos propriamente, denominados de CPC.

Segundo Fraidenraich (1994), um concentrador é formado por uma região absorvedora, absorvedor ou receptor, uma cavidade e uma fonte de luz (FIG. 3.1). Quando todos os raios de luz que incidem na cavidade atingem o absorvedor, o concentrador é considerado ideal. A geometria dos componentes de um concentrador pode ter várias formas.

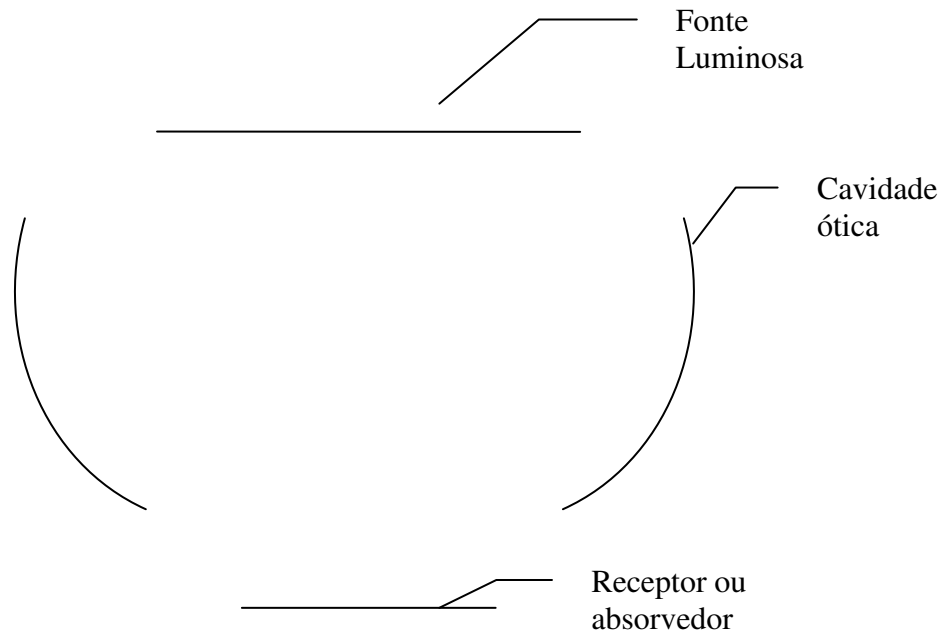


FIGURA 3.1 – Disposição geométrica do conjunto fonte, cavidade e receptor.
 FONTE – Fraidenraich (1994).

A avaliação das propriedades óticas das cavidades pode ser efetuada em duas dimensões, no plano da FIG. 3.1 (Fraidenraich, 1994). Tal fato é possível e demonstrado utilizando o *princípio dos raios limites* (Welford e Winston, 1989, citado por Fraidenraich, 1994). Esta teoria relata que, se todos os raios dos extremos da fonte de luz atingem completamente o absorvedor, então todos os raios provenientes de qualquer parte interior da fonte certamente atingem o absorvedor. Segundo o princípio dos raios limites, para a construção de cavidades ideais é necessário somente a utilização de raios extremos. Vários concentradores conhecidos da literatura utilizam este princípio (Fraidenraich 1994). O Concentrador Elíptico Composto, CEC, é um destes. Neste concentrador, a fonte e o absorvedor estão distantes, e a extremidade de um componente é unida à extremidade oposta do outro por segmentos lineares, para que todos os raios oriundos da fonte interceptem o absorvedor (Fraidenraich, 1994). Então, pode ser proposto um segmento de elipse em que seus focos situam-se nas extremidades deste segmento linear. Repetindo este processo para as outras extremidades da elipse é obtido o CEC (FIG. 3.2)

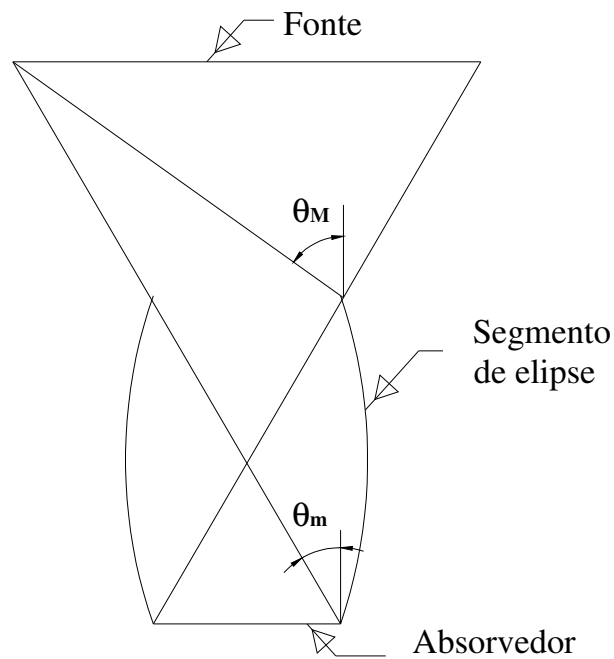


FIGURA 3.2 – Concentrador Elíptico Composto (CEC) com fonte e luz plana.
 FONTE - Fraidenraich (1994).

Pela FIG 3.2 nota-se que a cavidade é definida por dois ângulos, θ_m e θ_M . Colocando-se a fonte infinitamente distante do absorvedor tem-se $\theta_m = \theta_M$. Nesse caso as direções extremas se coincidem, e o refletor, antes formado por um segmento de elipse passa a ser representado por uma parábola. Esta nova configuração resulta em um CPC (Concentrador Parabólico Composto).

A partir dos mesmos conceitos usados para obtenção de um CPC pode ser obtido um Concentrador Hiperbólico Composto (CHC). Nesta nova configuração tem-se que a fonte virtual é formada pelo prolongamento dos raios luminosos quando atravessam o absorvedor (FIG 3.3).

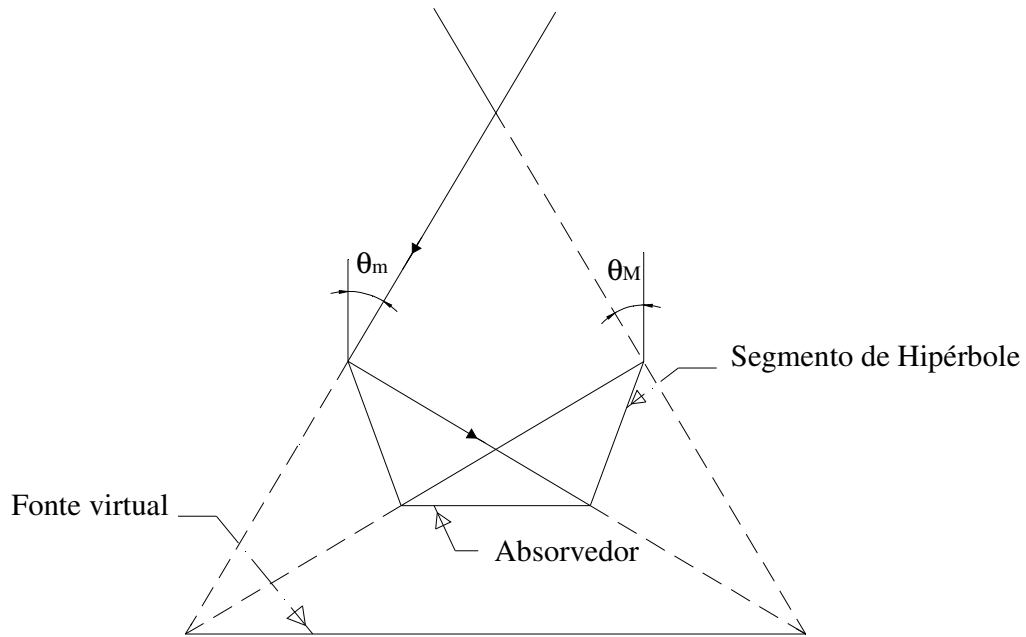


FIGURA 3.3 – Concentrador hiperbólico composto (CHC) com fonte e luz plana.

FONTE – Fraidenraich (1994).

No CHC as superfícies refletoras são constituídas por segmentos de hipérbole.

Como mencionado anteriormente neste texto, pode ser notada a existência de três tipos de cavidades, caracterizadas pela existência de fontes reais a distância finita (CEC), fontes reais a distância infinita (CPC) e fontes virtuais a distância finita (CHC).

Segundo Collares-Pereira *et al.* (1977), citado por Fraidenraich (1994), a associação destes tipos de cavidades óticas com sistemas convencionais formadores de imagem em uma região finita do espaço podem melhorar a intensidade de radiação coletada pelos concentradores. Por exemplo, colocando-se um CEC, de forma que a fonte luminosa seja a imagem de um sistema ótico primário (FIG 3.4) pode-se aumentar muito a eficiência destes concentradores.

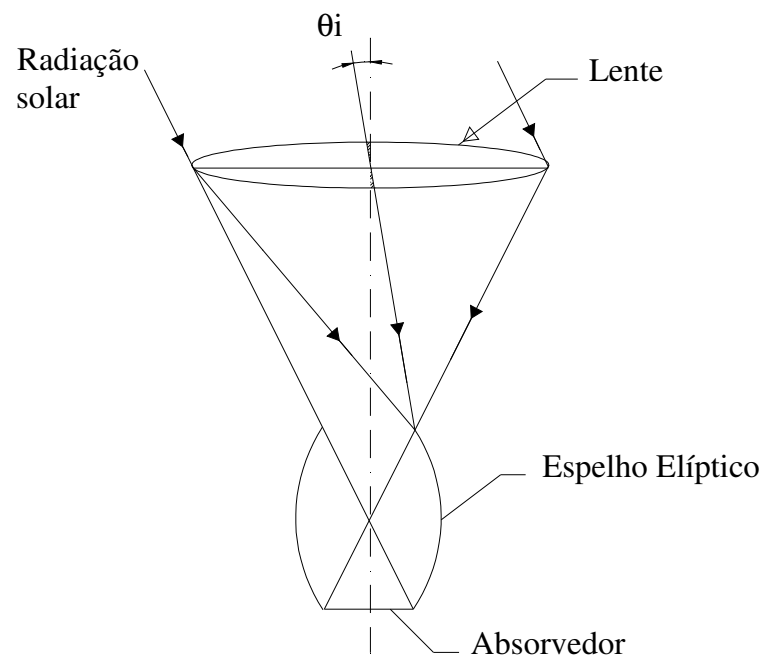


FIGURA 3.4 – Lente combinada com concentrador secundário tipo CEC.
 FONTE – Fraidenraich (1994).

Quando a imagem do sistema lente-cavidade estiver atrás da região absorvedora é requerido um concentrador do tipo CHC (FIG. 3.5).

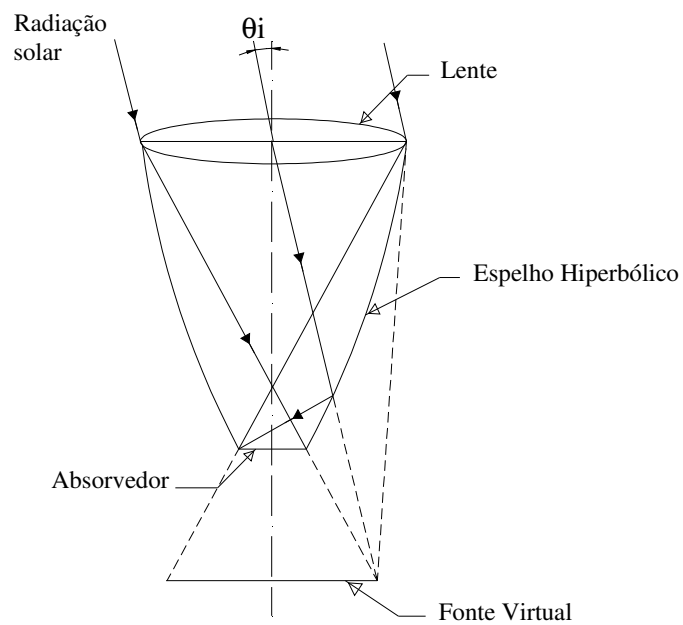


FIGURA 3.5 – Combinação lente e concentrador secundário tipo CHC.
 FONTE – Fraidenraich (1994).

De acordo com Fraidenraich (1994) as cavidades tipo V constituem um caso particular dos concentradores hiperbólicos compostos. Neste caso a distância $\overline{RERD} = \overline{RDFD}$ (FIG 3.6), a hipérbole do lado direito se converte em uma reta perpendicular àquela que une os pontos RE e FD. Com esta mesma condição aplicada à superfície esquerda, a cavidade então fica composta por superfícies refletoras planas.

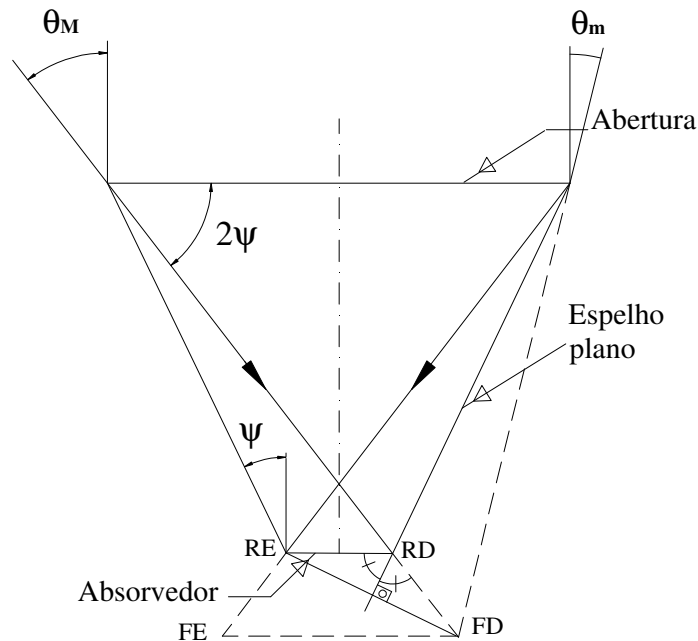


FIGURA 3.6 – Cavidade tipo V como caso particular de concentrador CHC
($\overline{RERD} = \overline{RDFD}$)

FONTE – Fraidenraich (1994).

Para os concentradores analisados (CEC, CHC e CPC) é necessário que os raios que atravessem os limites da extremidade superior das superfícies refletoras, entrando na cavidade, realizem uma reflexão no máximo até o absorvedor. Cavidades tipo V em que os raios experimentam mais de uma reflexão da abertura até o absorvedor podem ser avaliadas, porém são utilizados princípios mais complexos para abordagem.

As cavidades concentradoras podem ser caracterizadas pela função de aceitação angular, $F(\theta_i)$. Esta função, relativa a cavidades com paredes refletoras perfeitas, $\rho = 1$, é definida como a parcela de energia aceita pela cavidade quando iluminada por raios que incidem com o ângulo θ_i . Segundo Fraidenraich (1994) a função de aceitação angular dos concentradores CPC tem o comportamento mostrado na FIG. 3.7.

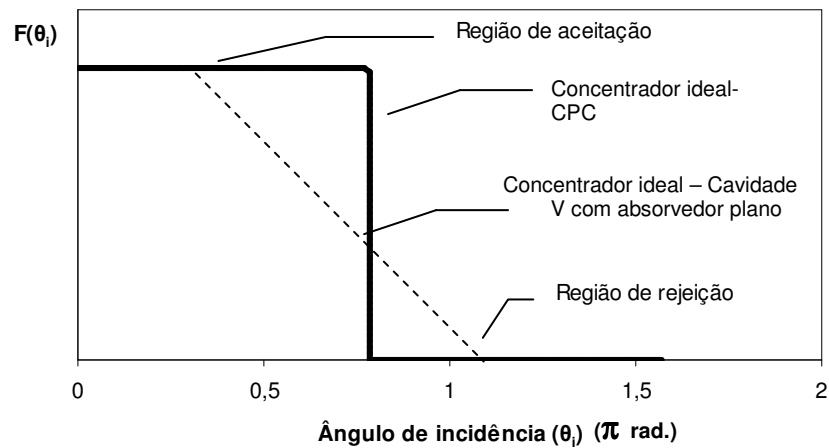


FIGURA 3.7 – Função de aceitação angular de concentradores parabólicos compostos.
 FONTE – adaptado de Fraidenraich (1994).

A forma da função de aceitação angular apresentada, em que a região de aceitação está separada por uma descontinuidade da região de rejeição, é geralmente retratada para concentradores ideais. Porém, outros modelos de concentradores, que possuem uma curva suave entre as duas regiões, podem ser considerados ideais (Fraidenraich 1994).

A função de aceitação angular, a eficiência ótica e o fluxo de radiação na região absorvedora caracterizam os concentradores não-formadores de imagens (Fraidenraich 1994).

As expressões analíticas da função de aceitação angular, $F(\theta_i)$, para diversos concentradores, com diversas geometrias do absorvedor foram obtidas por Carvalho et al. (1985) citado por Fraidenraich (1994). Adicionalmente, Georlette e Gordon (1994), citados por Fraidenraich (1994), obtiveram as expressões analíticas para concentradores tipo CHC e CEC. A função $F(\theta_i)$ obtida é aplicada a superfícies refletoras perfeitas ($\rho = 1$). Para paredes refletoras reais, onde a refletividade é menor que 100%, a cavidade é avaliada em termos de sua eficiência ótica, $\eta(\theta_i)$. Com esta eficiência é possível calcular a fração da radiação direta que incide na abertura com o ângulo θ_i e que acerta o absorvedor. Segundo Fraidenraich e Almeida (1991), para o cálculo de $\eta(\theta_i)$ é necessário determinar o peso estatístico dos raios que realizam k reflexões da abertura da cavidade até o absorvedor (k depende do local de incidência da radiação na abertura da cavidade).

Um procedimento que afeta todos os parâmetros mencionados é o truncamento (corte parcial da superfície refletora para redução de custos de material). As cavidades tipo V podem ser truncadas na parte superior reduzindo muito a superfície refletora com uma pequena perda de concentração (Mannan e Bannerot, 1978; Rabl, 1976). Com o truncamento da cavidade ocorre a aceitação parcial da radiação que se encontra fora do intervalo de aceitação angular (Fraidenraich, 1994).

3.2. Cavidades tipo V

Diversos estudos sobre a ótica de cavidades tipo V foram publicados (Hollands, 1971; Mannan e Bannerot, 1978; Fraidenaich, 1994). O método de auxílio à definição de propriedades óticas das cavidades tipo V, conhecido como o método das imagens, foi introduzido por Williamson (1952), citado por Fraidenaich (1994), que avaliou as propriedades óticas de superfícies cônicas com a finalidade de condensar a radiação luminosa. Anos mais tarde, Winston (1970), Baranov (1966) e Ploke (1976), citados por Fraidenaich (1994), também chegaram, em linhas de pesquisas independentes, a resultados matemáticos próximos dos de Williamson (1952).

Outras análises foram importantes para a avaliação da concentração máxima dos concentradores estacionários (Winston 1970, Tabor (1958), citados por Fraidenaich, 1994). Nestes estudos apresenta-se uma avaliação da viabilidade operacional das cavidades concentradoras ao longo do ano. Um dos primeiros estudos teóricos sobre as propriedades óticas dos concentradores tipo V foi realizado por Hollands (1971). Neste estudo definiram-se as condições de iluminação adequada dos módulos fotovoltaicos por estas cavidades. A condição de iluminação uniforme na região absorvedora destes módulos é fundamental para a viabilidade técnica das cavidades tipo V associadas a estes conversores fotovoltaicos. Além disto, neste mesmo trabalho, o autor utiliza o método das imagens múltiplas como ferramenta essencial para o estudo das propriedades óticas das cavidades. No estudo realizado por Hollands (1971) o número máximo de reflexões considerado no interior da cavidade foi igual a um, parâmetro muito importante para avaliação das propriedades óticas. Vários estudos sobre a ótica das cavidades tipo V, com a radiação sofrendo nenhuma ou uma reflexão, foram divulgados na década de 70 por Howell e Bannerot (1976) citados por Fraidenaich (1994), Mannan e Bannerot (1978), e Hollands (1971). Segundo Fraidenaich (1994) uma análise mais ampla é apresentada por Burkhard *et al.* (1978). Nesta última abordagem foram obtidas expressões analíticas para o cálculo da densidade de fluxo na região absorvedora em cavidades que sofrem um número arbitrário de reflexões. Porém, com as expressões analíticas obtidas não foi possível relacionar o número de reflexões com o ângulo de incidência da radiação na cavidade. Uma abordagem mais geral, apesar de não ser completamente analítica, foi desenvolvida por Fraidenaich e Almeida (1987). Neste último trabalho foi apresentada uma análise conceitual do comportamento ótico das cavidades tipo V e introduzida a noção de modo de reflexão e a categorização dos raios de luz incidentes de acordo com este modo, que é relativo ao número de reflexões que a radiação experimenta no seu caminho da abertura da cavidade até o absorvedor. Em outro trabalho realizado pelos mesmos autores (Fraidenaich e

Almeida, 1991) foram analisadas as relações a respeito do surgimento, presença e extinção dos modos de reflexão no interior da cavidade V. Adicionalmente neste mesmo estudo, os autores discutiram a validade de expressões analíticas aproximadas das propriedades óticas das cavidades tipo V e apresentaram resultados numéricos da eficiência ótica para radiação direta e difusa. Fraidenraich (1994) concluiu o estudo das cavidades óticas com o conceito de estados de iluminação do absorvedor. Nesta mesma referência são apresentadas as soluções analíticas para as propriedades óticas associadas à radiação solar aceita pelas cavidades tipo V e é apresentada uma aplicação adequada, em termos de relação custo-benefício, das cavidades tipo V de baixa razão de concentração ($C \leq 10$) e de extrema simplicidade construtiva em sistemas fotovoltaicos, para regiões de elevada radiação solar média global ao longo do ano.

Segundo Fraidenraich (1994) o método das imagens é utilizado em vários campos da física e aplicado com grande frequência a problemas de escoamento em meios porosos e em campos elétricos. Este autor define o método como uma elaboração de combinações lineares que reproduzem condições específicas de uma determinada fronteira.

A aplicação do método das imagens a cavidades tipo V é extremamente importante para determinação das propriedades óticas. Este método permite uma simplificação gráfica que facilita a obtenção de soluções analíticas destas propriedades.

O procedimento desenvolvido por Hollands (1971) e utilizado por Fraidenraich (1994) para aplicação do método, consiste em um esboço em duas dimensões da cavidade V associada ao absorvedor com a geometria previamente definida e suas possíveis imagens, tanto a direita como a esquerda. Este esquema é apresentado na FIG 3.8 para a configuração proposta no presente trabalho (coletor cilíndrico próximo ao vértice da cavidade).

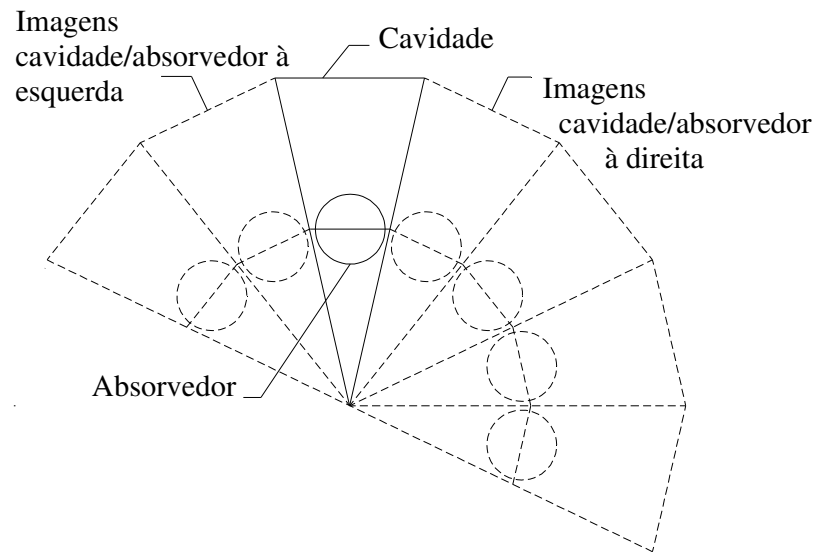


FIGURA 3.8 – Cavidade V associada a absorvedores cilíndricos próximos ao vértice, imagens à direita e a esquerda.

Após a construção do esboço (FIG 3.8) traçam-se os raios que interceptam a cavidade de acordo com posições representativas da fonte, obedecendo ao princípio dos raios limites, (FIG 3.9).

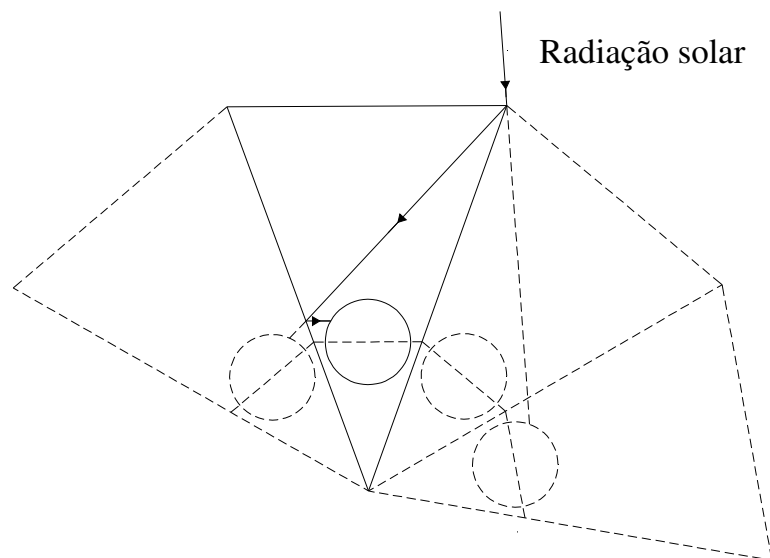


FIGURA 3.9 – Comportamento da radiação solar incidente na cavidade V.

A partir da cavidade/concentrador e suas imagens é possível trabalhar com o prolongamento dos raios refletidos (FIG. 3.10). Desta forma torna-se viável e simples a formulação das propriedades óticas e radiantes associadas a parâmetros físicos da cavidade e do absorvedor.

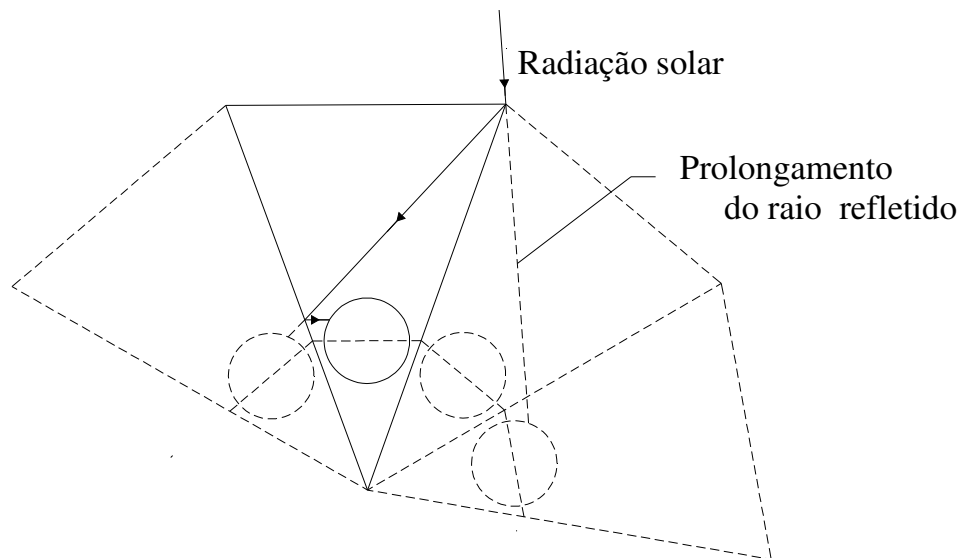


FIGURA 3.10 – Representação do prolongamento dos raios refletidos.

Das ferramentas físicas e matemáticas utilizadas para a determinação das propriedades óticas e radiantes das cavidades tipo V (Apêndices A e B) as mais importantes são a lei dos senos e a ótica aplicada a superfícies refletoras.

4. MODELAGEM MATEMÁTICA DO COLETOR SOLAR COMPOSTO DE CAVIDADES V

4.1 Cavidades tipo V com absorvedor cilíndrico

O modelo matemático a ser apresentado, neste estudo, destina-se à predição do comportamento térmico de um coletor solar composto de cavidades V com absorvedor tubular (cilíndrico) para aquecimento de água. O modelo matemático foi elaborado a partir de um tratamento ótico da radiação solar e de uma análise térmica envolvendo um balanço de energia na cavidade concentradora. A análise ótica baseia-se na ótica de cavidades V com absorvedor plano que é modificada para uma configuração com absorvedor tubular. A análise térmica envolve um balanço de energia similar ao adotado em CPC (Hsieh, 1971; Leão, 1989).

As cavidades V associadas a absorvedores planos estudadas por Hollands (1971) e Fraidenraich (1994) constituem-se, fisicamente em duas dimensões, por trapézios isósceles invertidos, com sua base menor representada pelo absorvedor plano e a base maior voltada para incidência da radiação solar. Nesses estudos, o absorvedor plano é formado por módulos fotovoltaicos (FIG 4.1).

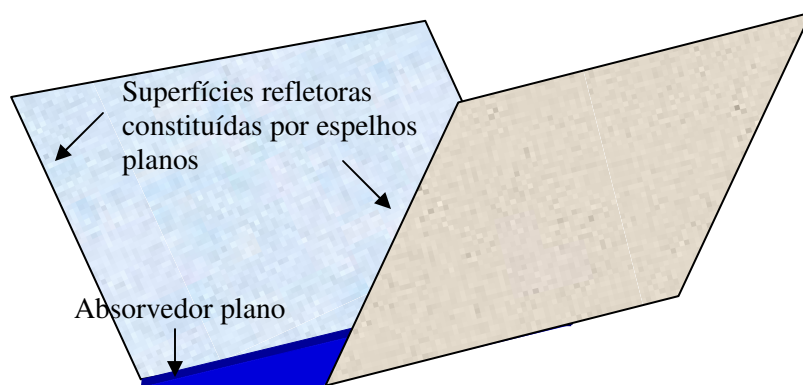


FIGURA 4.1 – Representação esquemática da cavidade V.

No caso de aquecimento de fluido (p.ex. água), a cavidade V deve ser provida, em lugar do absorvedor plano, de um tubo para absorção de radiação solar e aquecimento do escoamento, denominado absorvedor tubular. Esta alteração leva a uma configuração geométrica ligeiramente diferente da anterior, como se pode observar na FIG 4.2.

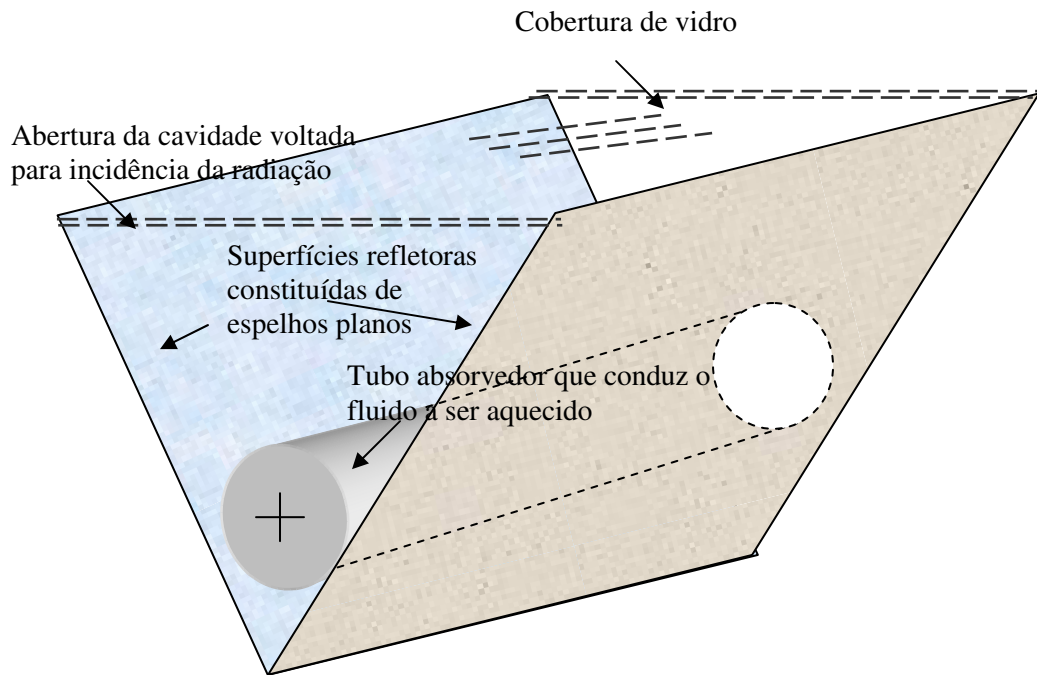


FIGURA 4.2 – Cavidade V com absorvedor tubular cilíndrico.

O coletor solar, proposto neste trabalho, é composto de várias cavidades V associadas em paralelo e encerradas em uma estrutura prismática, cuja superfície superior é uma placa transparente (preferencialmente em vidro), como ilustrado na FIG 4.3.

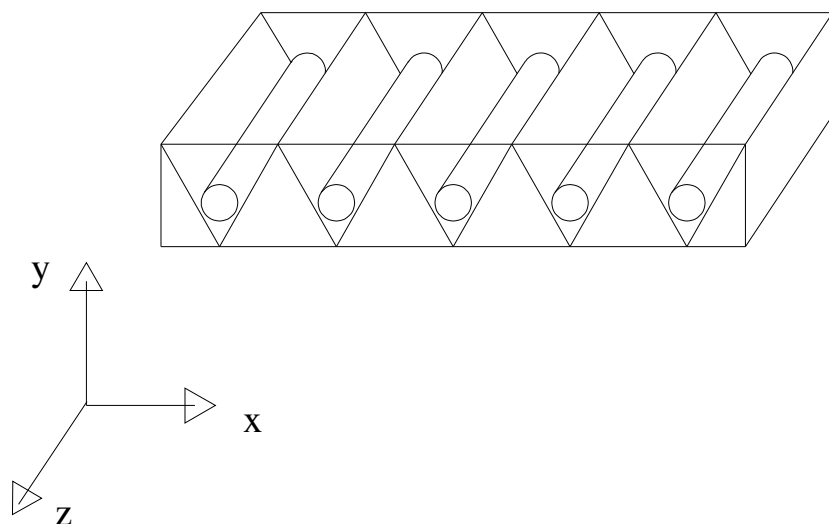


FIGURA 4.3 – Esquema do coletor solar composto por cavidades V.

A radiação incidente na abertura da cavidade tipo V se decompõe em uma fração que atinge o absorvedor, denominada radiação aceita, e uma outra fração que retorna para a abertura, denominada radiação rejeitada (Fraidenraich e Almeida, 1991). Estas frações estão

estritamente associadas a parâmetros físicos da cavidade (semi-ângulo do vértice, razão de concentração, número de reflexões que a radiação experimenta no interior do concentrador, ângulo de incidência da radiação) e são tratadas de maneira independente.

A partir das expressões relativas à geometria e à ótica das cavidades tipo V estimam-se os parâmetros geométricos da cavidade para definição das dimensões construtivas do coletor solar. Esta investigação tem a finalidade de proporcionar a construção de um coletor solar com dimensões similares às de coletores solares planos convencionais disponíveis no mercado. Simultaneamente ao desenvolvimento da configuração coletor composto por cavidades V e com as expressões que calculam as propriedades óticas definidas, torna-se possível a determinação das condições térmicas operacionais do coletor. Tal prática consiste principalmente em determinar a temperatura de saída do líquido no coletor e sua curva de eficiência característica.

O modelo matemático aqui desenvolvido, para avaliação das propriedades óticas e térmicas citadas, é implementado no software EES, Engineering Equation Solver, através de um algoritmo computacional.

4.1.1 Aspectos gerais da geometria e da ótica das cavidades tipo V

O semi-ângulo do vértice, ψ , e a razão de concentração, C , são parâmetros extremamente importantes para o estudo das cavidades tipo V. A razão de concentração é definida como a relação entre a área da abertura pela área do absorvedor (Duffie e Beckman, 1991). Porém, devido à possibilidade de se trabalhar no plano de acordo com o princípio dos raios limites Welford e Winston (1989) (citado por Fraidenraich, 1994), resulta a expressão para a razão de concentração para a cavidade tipo V proposta (EQ. 4.1).

$$C = \frac{A}{2rm} \quad (4.1)$$

Onde A é a largura da abertura da cavidade e $2rm$ é a largura de projeção do fluxo de calor no absorvedor.

A EQ 4.1 pode ser facilmente obtida a partir da FIG 4.4. Nesta figura observam-se alguns elementos geométricos importantes, como o semi-ângulo do vértice, ψ , uma linha imaginária paralela à abertura da cavidade que passa pelo centro do tubo absorvedor, l , e a distância entre o tudo e a superfície refletora, yr .

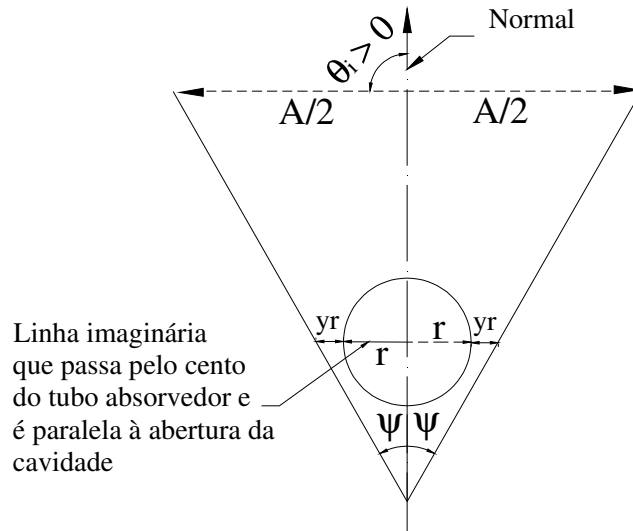


FIGURA 4.4 – Ilustração dos elementos fundamentais da cavidade V.

Os raios incidentes na abertura da cavidade podem atingir o absorvedor ou retornar à atmosfera. Em sua trajetória, os raios luminosos podem sofrer certo número de reflexões no interior da cavidade. Quando feixes de raios sofrem um mesmo número de reflexões (s) tem-se estabelecido um modo de reflexão. Em relação ao modo de reflexão é possível definir uma função $P_s(\theta_i)$. Esta função representa a fração dos raios que, incidentes na abertura com um ângulo θ_i , podem atingir o absorvedor ou retornar a abertura após sofrerem (s) reflexões. Fraidenraich (1994) propõe uma eficiência ótica para um determinado ângulo de incidência com base na função $P_s(\theta_i)$ (EQ 4.2).

$$\eta_{ot}(\theta_i) = \sum_{s=0}^{M(\theta_i)} P_s(\theta_i) \rho^s \quad (4.2)$$

Sendo $M(\theta_i)$ o número máximo de reflexões da radiação na cavidade em função do ângulo θ_i .

A função de aceitação angular também pode ser expressa em função de $P_s(\theta_i)$

$$F(\theta_i) = \sum_{s=0}^M P_s(\theta_i) \quad (4.3)$$

Segundo Fraidenraich (1994), as EQ 4.2 e 4.3 podem ser utilizadas para radiação aceita ou rejeitada, pois somente $P_s(\theta_i)$ varia para estas componentes da radiação.

Os raios luminosos podem sofrer diversas reflexões no interior da cavidade, o que condiciona a forma de iluminação do absorvedor, bem como permite estimar os raios que

retornam para a abertura e deixam o dispositivo. O conhecimento completo do comportamento de todos os raios dentro da cavidade, isto é, sua caracterização ótica é extremamente importante para aplicação deste concentrador no aquecimento de fluido.

Um modo de reflexão tem um domínio angular específico dentro do intervalo de aceitação. O limite deste domínio angular pode ser definido pelos seguintes ângulos, denominados ângulos característicos:

- α_k é o menor ângulo de incidência, em módulo, para o qual a radiação é aceita pela cavidade (atinge o absorvedor) no modo de reflexão k ;
- β_k é o maior ângulo de incidência, em módulo, para o qual a radiação é aceita pela cavidade no modo de reflexão k ;
- γ_k é o menor ângulo de incidência, em módulo, em que a radiação é rejeitada pela cavidade (retorna a atmosfera) após realizar $2k$ reflexões;
- δ_k é o menor ângulo de incidência, em módulo, em que a radiação é rejeitada pela cavidade após realizar $2k + 1$ reflexões.

Os dois primeiros ângulos apresentados α_k e β_k atingem o absorvedor interceptando a linha imaginária, l .

Partindo da metodologia proposta por Fraidenraich (1991), os ângulos positivos são definidos no sentido anti-horário (FIG 4.4). Por convenção, os modos de reflexão são associados ao espelho atingido na primeira reflexão, espelho direito ou esquerdo. À radiação que atinge o absorvedor sem reflexões será atribuído o modo zero de reflexão e associado ao espelho direito.

Para um melhor entendimento dos ângulos característicos e dos modos de reflexão, um esquema básico na FIG 4.5 ilustra os ângulos característicos α_2 e β_0 . Na FIG 4.6 são mostrados δ_2 e γ_3 .

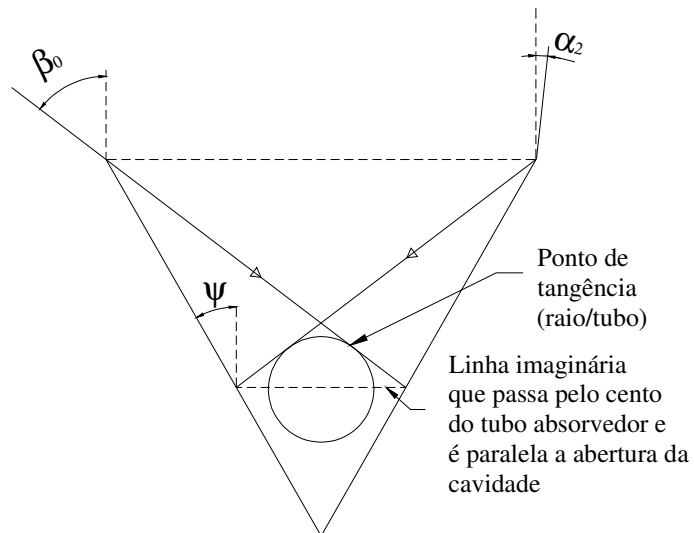


FIGURA 4.5 – Ângulos característicos α_2 e β_0 .

FONTE: Adaptado de Fraidenraich e Almeida (1987).

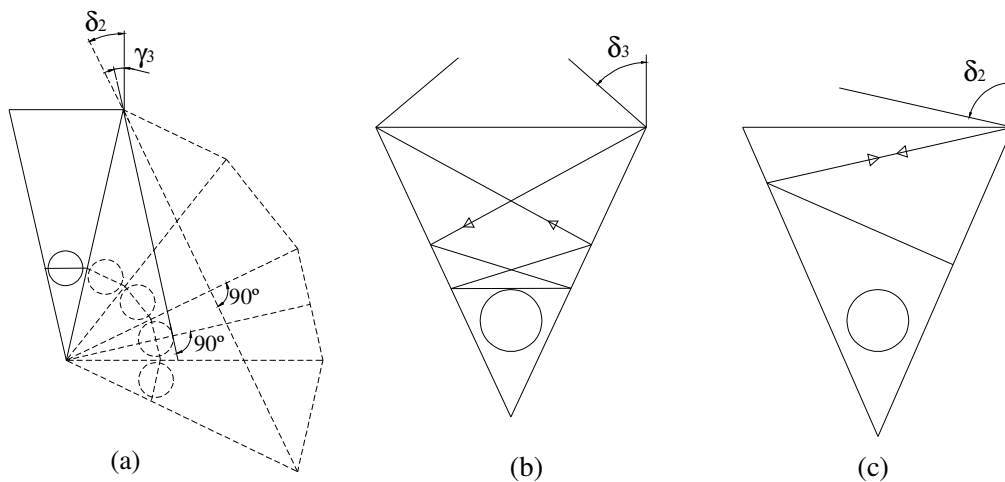


FIGURA 4.6 – Ângulos característicos δ_2 e γ_3 .

FONTE – Adaptado de Fraidenraich e Almeida (1987).

O método das imagens (descrito no capítulo 3) é utilizado para obter as EQ 4.4 - 4.7 (Apêndice A) que definem os ângulos característicos α_k , β_k , δ_k , γ_k .

$$\alpha_k = \arctg \left\{ \frac{\frac{2}{C-1} \text{sen}[(k-1)\psi] \cos(k\psi) - \text{sen}\psi}{\frac{2}{C-1} \text{sen}[(k-1)\psi] \text{sen}(k\psi) + \cos\psi} \right\} \quad (4.4)$$

$$\beta_k = 2\psi - \alpha_{k+2} \quad (4.5)$$

$$\gamma_k = \frac{\pi}{2} - 2k\psi \quad (4.6)$$

$$\delta_k = \frac{\pi}{2} - (2k+1)\psi \quad (4.7)$$

Onde $m = (1+y)$ com y sendo uma distância relativa ao raio r (FIG 4.4), do centro do tubo absorvedor até a superfície refletora em uma direção paralela à abertura da cavidade e ao diâmetro do tubo; C = razão de concentração; k = modo de reflexão da radiação aceita; ψ = semi-ângulo do vértice.

A iluminação do absorvedor é realizada pelos raios que atravessam a abertura e, após certo número de reflexões, atingem o tubo absorvedor. Portanto, são identificados três estados de iluminação do absorvedor: *estado ascendente*, *estado completo*, *estado descendente*.

- (1) **Estado ascendente.** No estado ascendente inicia-se a iluminação de parte do absorvedor até a iluminação total desta parte. Para certo modo de reflexão k , em que toda radiação ou seu prolongamento intercepta a linha l , o domínio angular do estado ascendente começa no ângulo α_k e termina em α_{k+1} . Para a radiação que seria rejeitada caso não houvesse o tubo absorvedor o intervalo angular inicia-se com o ângulo α_k e termina em γ_{k+1} ou δ_k de acordo com o modo k ;
- (2) **Estado completo.** O intervalo angular do estado completo é variável de acordo com o modo de reflexão, para modos em que $k > 0$ inicia-se no ângulo α_{k+1} e termina em β_{k-1} . Para a configuração proposta somente modos de reflexão $k = 0$ iluminam a máxima fração considerada do absorvedor, πr , sendo o estado completo, estudado por Fraidenraich e Almeida (1978), migrado para o estado descendente. A radiação que seria rejeitada também pode iluminar de forma completa uma determinada região menor que πr do absorvedor, o ângulo de incidência desta radiação está associado aos ângulos β_k ou α_k ;
- (3) **Estado descendente.** No estado descendente, a fração do absorvedor inicia-se completamente iluminada e então vai perdendo iluminação até ser extinta. Para um modo de reflexão k em que radiação intercepta a linha imaginária l , já descrita, o domínio angular começa no ângulo β_{k-1} e termina em β_k , e devido à migração comentada do estado completo para modos em que $k > 0$ o estado descendente também se inicia no

ângulo α_{k+1} e termina em β_{k-1} . Para a radiação que seria rejeitada em associações típicas entre cavidades tipo V e módulos fotovoltaicos, ou seja, que não intercepta a linha imaginária, pode haver modos completos associados aos ângulos característicos β_k e α_k que iluminam uma pequena fração do absorvedor menor que πr .

Os estados de iluminação do absorvedor variam de acordo com o semi-ângulo do vértice, a razão de concentração e o ângulo de incidência da radiação. Conforme os valores de ψ e C , uma cavidade V pode aceitar ou rejeitar raios com determinado ângulo de incidência, θ_i , com o modo de reflexão s .

Os estados de iluminação ascendente e completo para os raios que interceptam a linha imaginária, l , para $k = 1$, são ilustrados na FIG 4.7.

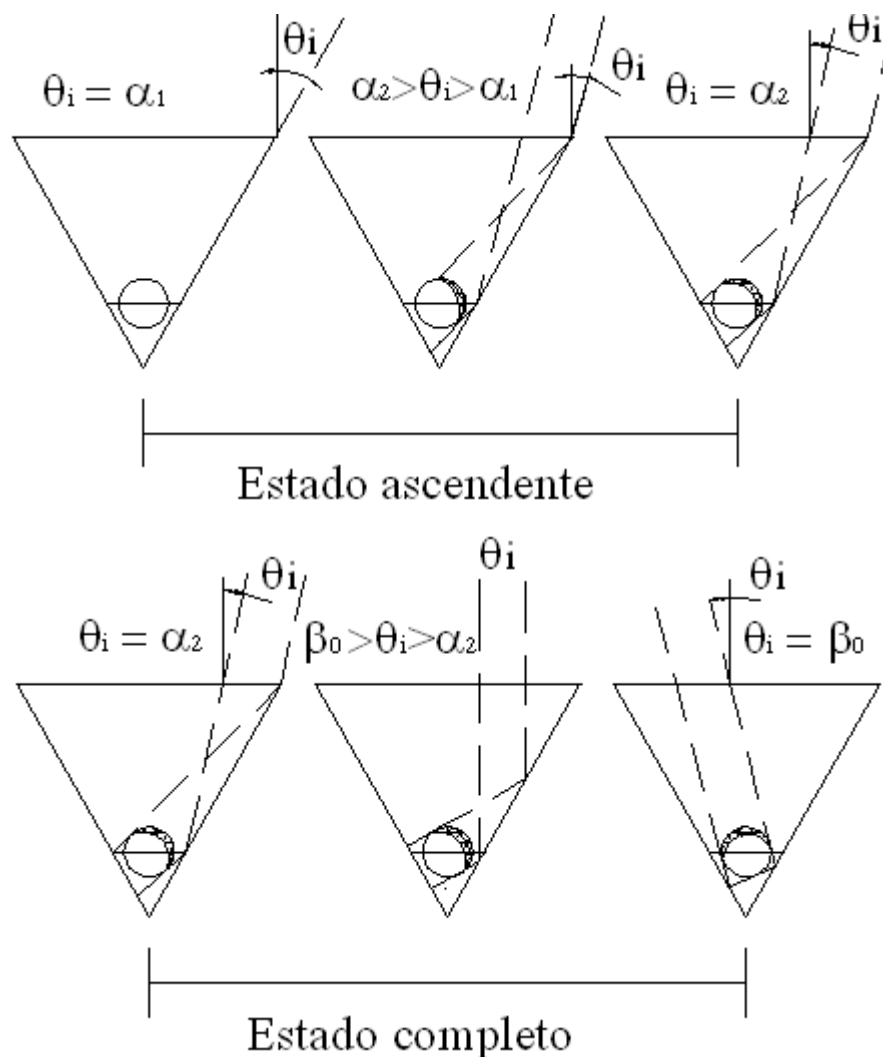


FIGURA 4.7 – Representação dos dois estados (ascendente e completo) para $k = 1$.

FONTE – Adaptado de Fraidenraich (1991).

O estado descendente é apresentado na FIG 4.8. Neste estado, fixados C e ψ ocorre a absorção de radiação aceita que seria rejeitada em virtude da forma cilíndrica do absorvedor, ou seja, corresponde à radiação que não intercepta l .

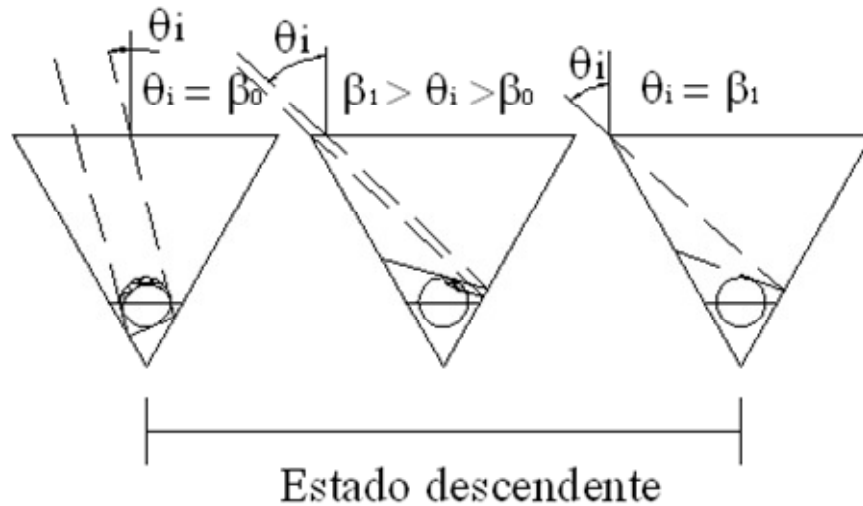


FIGURA 4.8 – Representação do estado descendente para $k = 1$.

FONTE - Adaptado de Fraidenraich (1991).

Em relação à radiação que retorna à atmosfera, Fraidenraich (1991) propõe o tratamento separado dos modos de reflexão pares e ímpares.

Para a radiação rejeitada são observados dois estados de iluminação da abertura. O primeiro é o estado ascendente. Durante este estado, a iluminação da abertura, pela radiação rejeitada, aumenta de zero até sua iluminação completa. Os limites do domínio angular deste estado para os modos pares, $2k$, são δ_k (limite inferior) e γ_k (limite superior). Para os modos ímpares, $2k+1$, estes limites são γ_{k+1} e δ_k , limite inferior e superior, respectivamente.

Para o estado descendente, a iluminação da abertura decresce de total até sua extinção. Os limites deste estado para ordem par, $2k$, é (γ_k, δ_{k-1}) e para ordem ímpar, $2k+1$, é (δ_k, γ_k) .

Na FIG 4.9, são apresentados os estados de iluminação da abertura para o quarto modo de reflexão, $2k = 4$, quando o ângulo de incidência varia de δ_2 até δ_1 .

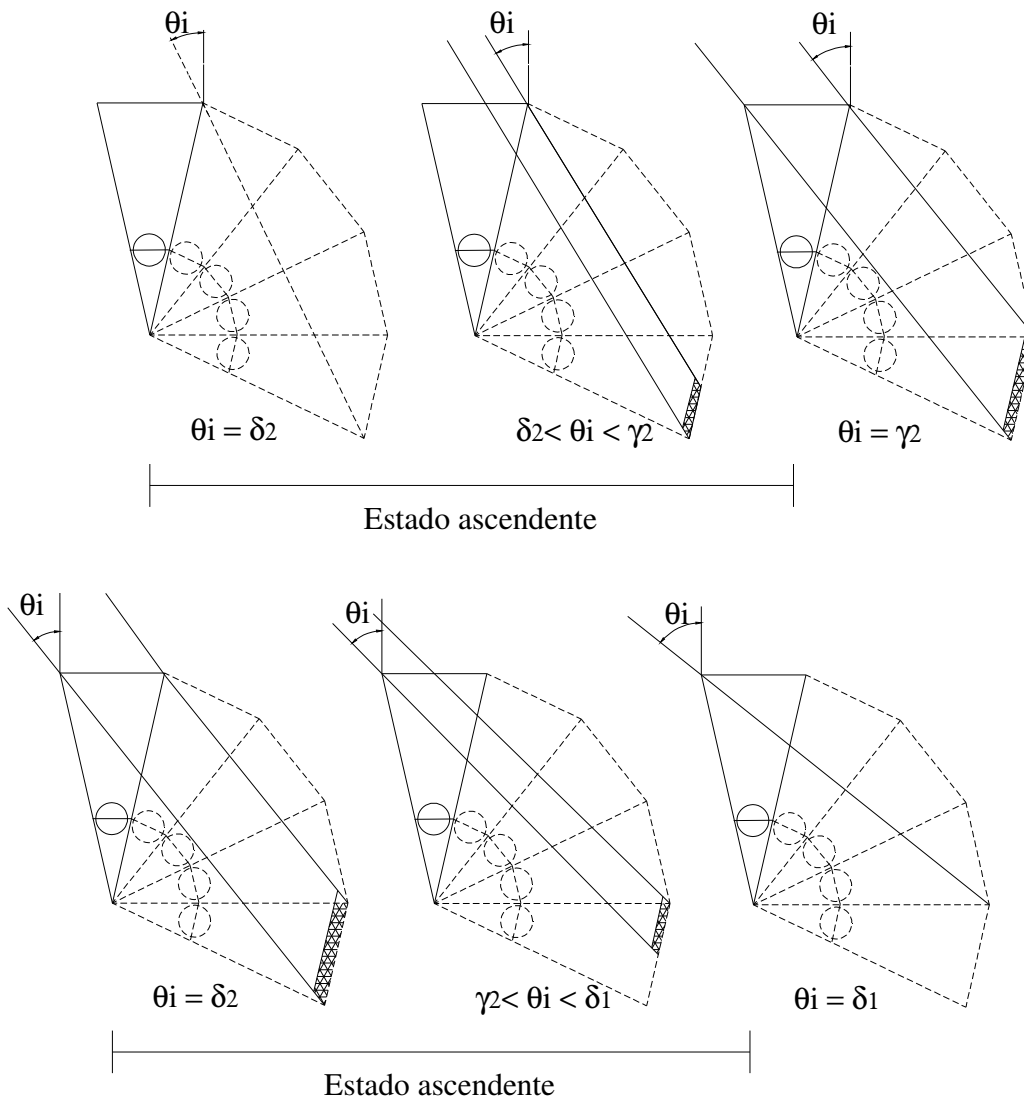


FIGURA 4.9 – Estados ascendentes e descendentes de iluminação da abertura para 4 reflexões reais da radiação rejeitada.

FONTE - Adaptado de Fraidenraich (1991).

Em uma visão prática, o subscrito k relativo aos ângulos γ e δ indica o número de reflexões dos raios em direção ao absorvedor, desprezando o número de reflexões por estes raios em direção ao retorno à abertura. Por exemplo, raios incidentes com o ângulo δ_2 realizam duas reflexões em direção ao tubo absorvedor e mais duas reflexões em direção à abertura, num total de 4 reflexões.

Nas cavidades tipo V, a função de aceitação angular pode apresentar um comportamento completamente adverso dos demais concentradores, com a presença do absorvedor cilíndrico próximo ao vértice. Entretanto, os limites angulares de determinados

modos de iluminação do tubo são equivalentes a cavidades tipo V com absorvedores planos. Estes limites são $(\alpha_{N+1}, \beta_{N-1})$, que pela EQ 4.7 tem comprimento igual a 2ψ . Este resultado é válido para a radiação que intercepta as extremidades de l , ou têm uma trajetória simétrica no interior da cavidade. O sufixo N indica o modo de reflexão de maior ordem para a radiação aceita pela cavidade. Este modo tem a particularidade de se extinguir enquanto se encontra em um estado de iluminação completa, comportamento que difere dos outros modos, que decresce a iluminação do absorvedor a partir da região de transição. Fraidenraich (1994) propõe um procedimento gráfico para determinar os ângulos α_{N+1} e β_{N-1} , que foi adaptado e mostrado na FIG 4.10 em que os ângulos são definidos pelas tangentes ao polígono central de múltiplas imagens do absorvedor.

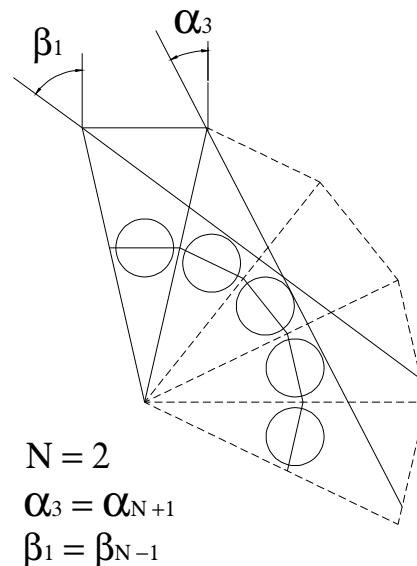


FIGURA 4.10 – Procedimento gráfico para determinar os ângulos α_{N+1} e β_{N-1} .

FONTE - Adaptado de Fraidenraich (1994).

Um procedimento gráfico é utilizado para determinação do máximo modo de reflexão da radiação rejeitada, que tem início em $\theta_i = \alpha_{N+1}$. Neste procedimento, o trajeto de retorno da radiação, que incide com o ângulo θ_i , ligeiramente maior que α_{N+1} , pode realizar N ou $N+1$ reflexões, totalizando $M = 2N$ ou $M = 2N + 1$ reflexões no seu caminho até a abertura, como mostram as FIG 4.11 e 4.12.

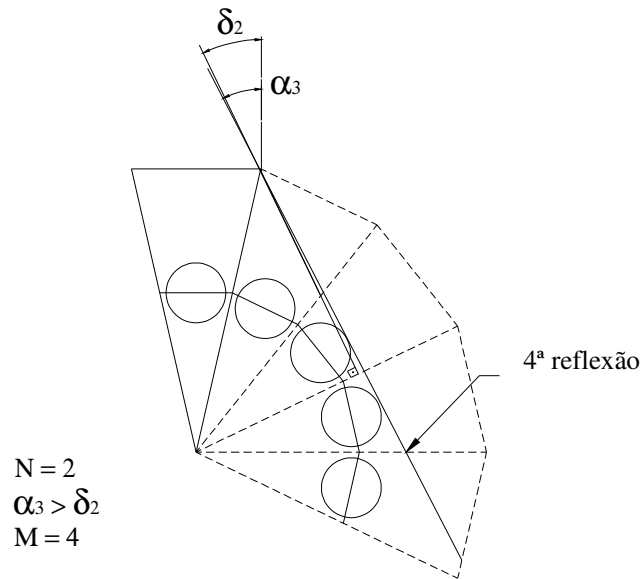


FIGURA 4.11 – Determinação dos modos de maior ordem da radiação rejeitada, $\alpha_3 > \delta_2$, e $M=4$.
 FONTE - Adaptado de Fraidenraich (1994).

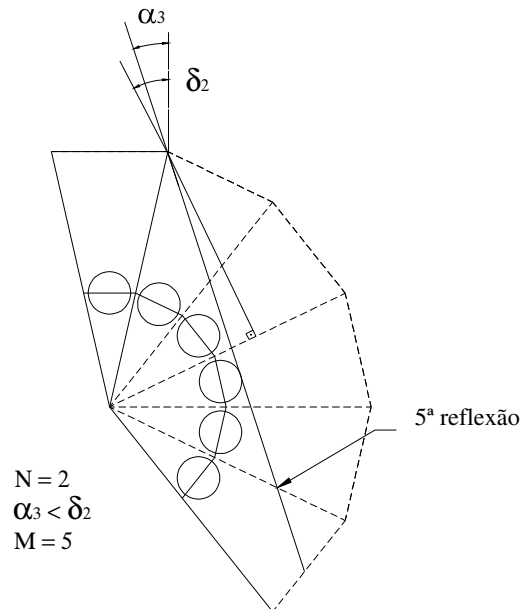


FIGURA 4.12 – Determinação dos modos de maior ordem da radiação rejeitada, $\alpha_3 < \delta_2$ e $M=5$.
 FONTE – Adaptado de Fraidenraich (1994).

O número máximo de reflexões (M) depende da relação entre os ângulos α_{N+1} e δ_N , que tem suporte nas EQ 4.8 e 4.9.

$$M = 2N + 1 \quad \text{se} \quad \alpha_{N+1} < \delta_N \quad (4.8)$$

$$M = 2N \quad \text{se} \quad \alpha_{N+1} \geq \delta_N \quad (4.9)$$

4.1.2 Propriedades gerais das funções $P_s(\theta_i)$

Para um ângulo qualquer de incidência da radiação, que atinge o absorvedor ou retorna a atmosfera, à abertura pode ser subdividida em intervalos de tamanho $A_s(\theta_i)$. A razão entre cada intervalo A_s pelo comprimento total da abertura, A , define a função $P_s(\theta_i)$ (EQ 4.10).

$$P_s(\theta_i) = \frac{A_s(\theta_i)}{A} \quad (4.10)$$

O sufixo (s) das funções $P_s(\theta_i)$ é definido da seguinte forma:

$$s = k \quad \text{para radiação aceita} \quad (4.11)$$

$$s = n \quad \text{para radiação rejeitada} \quad (4.12)$$

Para $s \geq 1$ a função $P_s(\theta_i)$ pode representar a soma das contribuições dos espelhos direito e esquerdo, que é dada pela EQ 4.13.

$$P_s(\theta_i) = P_s^D(\theta_i) + P_s^E(\theta_i) \quad s \geq 1 \quad (4.13)$$

Os sobrescritos E e D da EQ 4.13 referem-se aos espelhos esquerdo e direito respectivamente, onde ocorre a primeira reflexão.

Em torno de $\theta_i = 0$, a função $P_s(\theta_i)$ é simétrica e a análise da trajetória dos raios, que também apresenta certa simetria, mostra a seguinte relação.

$$P_s^D(-\theta_i) = P_s^E(\theta_i) \quad s \geq 1 \quad (4.14)$$

Substituindo a EQ 4.14 na EQ 4.13, que expressa a soma das contribuições dos espelhos direito e esquerdo, tem-se a EQ 4.15, que é simétrica em torno de $\theta_i = 0$.

$$P_s(\theta_i) = P_s^D(\theta_i) + P_s^D(-\theta_i) \quad s \geq 1 \quad (4.15)$$

Com base na EQ 4.11, que para radiação aceita $s = k$, a EQ 4.15 torna-se válida para $s \geq 1$.

O modo zero de reflexão, que é associado ao espelho direito, mostrado na EQ 4.16, só ocorre para radiação aceita, pois não é possível a radiação entrar na cavidade e retornar à abertura sem sofrer pelo menos uma reflexão.

$$P_0(\theta_i) = P_0^D(\theta_i) \quad P_0^E(\theta_i) = 0 \quad (4.16)$$

As expressões analíticas de $P_s(\theta_i)$ associadas aos diversos estados de iluminação do absorvedor e da abertura são apresentadas a seguir e demonstradas no Apêndice B.

4.1.2.1 Estado completo – contribuição do espelho direito

Este estado não corresponde à iluminação completa do absorvedor, mas sim à maior fração possível iluminada por modos de reflexão k , que corresponde à metade da superfície do tubo absorvedor. Um determinado modo de reflexão k com um ângulo de incidência θ_i para a radiação aceita, intercepta no máximo metade do absorvedor. Isto ocorre devido à configuração do sistema que mantém grande parte do tubo voltada para o vértice da cavidade, em sentido oposto à abertura da mesma. As expressões analíticas de $P_s(\theta_i)$ obtidas no presente estudo levam em conta toda a superfície do absorvedor devido à definição de razão de concentração C em concordância com Duffie e Beckman (1991), dada pela EQ 4.1. Porém, em termos práticos, o estado completo descrito considera apenas a metade do absorvedor para a radiação que intercepta a reta imaginária l .

O modo $k = 0$ é o único responsável pela iluminação completa do absorvedor em um grande intervalo angular. Existem modos completos para ângulos únicos associados a α_k e β_k . Para o modo $k = 0$, $P_0(\theta_i)$ é definida pela EQ 4.17.

$$P_0(\theta_i) = \frac{1}{mC \cos \theta_i} \quad |\theta_i| \leq |\zeta| \quad (4.17)$$

O intervalo angular $(-\zeta, +\zeta)$, em que o modo $k = 0$ existe no estado completo para a radiação incidente na abertura com ângulo θ_i pode ser calculado a partir de parâmetros físicos da cavidade de acordo com a EQ 4.18.

$$tg\zeta \left[\frac{1}{mC} \left(\frac{1}{sen\zeta} - \frac{m}{tg\psi} \right) + \frac{1}{tg\psi} \right] = 1 \quad (4.18)$$

Entretanto, aproximando-se o quanto possível de forma que o absorvedor não entre em contato com as superfícies refletoras, para que não haja dano nestas superfícies devido à transmissão de calor por condução, o intervalo angular da radiação incidente para a função $P_o(\theta_i)$ é igual a 2ψ .

O parâmetro $m = (1 + y)$ é definido a partir de y relativo à cavidade e ajustado com base na EQ 4.19.

$$y = \frac{1}{\cos\psi} \left(1 + \frac{a}{r} \right) - 1 \quad (4.19)$$

Onde a é a mínima distância necessária ao isolamento entre a superfície refletora e o tubo absorvedor (FIG 4.13).

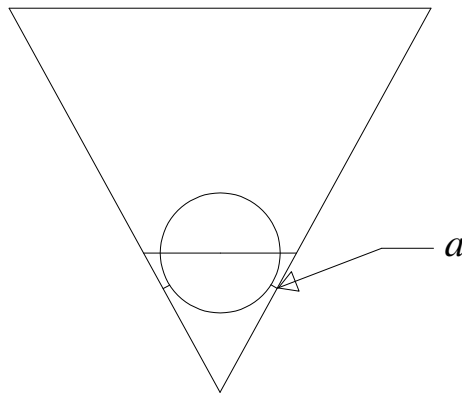


FIGURA 4.13 – Ilustração da distância mínima entre o tubo absorvedor e as superfícies refletoras.

4.1.2.2 Estado ascendente – contribuição do espelho direito

A radiação que ilumina de forma ascendente o absorvedor é dividida em dois grupos. O primeiro considera a radiação que se propaga na direção da reta l e intercepta o absorvedor iniciando a iluminação do mesmo, de zero até uma extensão equivalente a πr . O

segundo grupo considerado avalia a radiação que não intercepta l , mas atinge o absorvedor e ilumina-o de zero a uma região que é menor que πr .

A expressão analítica de $P_k(\theta_i)$ para o primeiro grupo da radiação que ilumina o absorvedor de forma ascendente é dada pela EQ 4.20. Esta equação foi adaptada de Fraidenraich (1994).

$$P_k(\theta_i) = \frac{(C-1) \operatorname{sen}(\alpha_k + \psi)}{2C \operatorname{sen}\psi} \frac{1}{\cos \theta_i} \left[\frac{\operatorname{sen}(\theta_i + \psi)}{\operatorname{sen}(\alpha_k + \psi)} - \frac{\cos(\theta_i + k\psi)}{\cos(\alpha_k + k\psi)} \right] \quad \alpha_k \leq \theta_i \leq \alpha_{k+1} \quad (4.20)$$

Para o segundo grupo, o cálculo de $P_k(\theta_i)$ é realizado pelas EQ 4.21-4.24. Estas equações não necessitam de ângulos α_k para solução. Isto se deve à metodologia de cálculo aplicada e demonstrada no Apêndice B que resulta em equações distintas utilizadas para obtenção de funções $P_k(\theta_i)$ quando $k = 2$, $k > 2$ (para modos de reflexões pares) e $k > 2$ (para modos de reflexões ímpares).

$$P_3(\theta_i) = \frac{1}{mC \cos(\theta_i)} \left(\frac{m(C-2) \operatorname{sen}(\theta_i + \psi)}{2 \operatorname{sen}\psi} - 1 - m \cos(\theta_i + 2\psi) \right) \quad \alpha_N < \theta_i < \alpha_{N+1} \quad (4.21)$$

A EQ 4.21, relativa à $P_3(\theta_i)$ para $k = 2$, refere-se à radiação que atravessa a abertura da cavidade e intercepta o absorvedor após duas reflexões reais no interior do concentrador. Isto se deve ao modo de reflexão dos ângulos característicos α_k realizarem $k-1$ reflexões reais no interior da cavidade tipo V, que é uma convenção imposta devido à trajetória simétrica da radiação incidente com ângulos α_{k+2} e β_k no interior da cavidade e descrita pela EQ 4.5.

Para regiões não abrangidas pela equação anterior devido à presença do absorvedor próximo ao vértice da cavidade V, o estado ascendente é definido pela EQ 4.22. Esta consideração se deve ao não avanço da radiação sobre a imagem do absorvedor interceptada pela radiação referente à EQ 4.21.

$$P_k(\theta_i) = \frac{\cos(\theta_i + 2k\psi)}{2mC \cos(\theta_i)} \left(\frac{1}{\cos(\theta_i + 2k\psi)} - m \right) \quad \alpha_k < \theta_i < \alpha_N \quad (4.22)$$

Para $k > 2$, o cálculo de $P_k(\theta_i)$ é realizado a partir da EQ 4.23 para modos de reflexão pares maiores que dois.

$$P_k(\theta_i) = \frac{1}{2mC} \frac{\cos[(\theta_i + (k-1)\psi]}{\cos(\theta_i + 2k\psi)} \left\{ \frac{1}{\cos[(\theta_i + (k-1)\psi]} \left[\frac{m(C-1)\text{sen}(\theta_i + \psi)}{\text{sen}(\psi)} + m \cos[(\theta_i + (k-1)\psi] - 1 \right] - 2mn^{**} \right\}$$

$$\alpha_N < \theta_i < \alpha_{N+1} \quad (4.23)$$

$$\text{Onde: } n^{**} = 2 \sum_{k=4}^{\infty} [\cos(k-3)\psi]$$

Para modos ímpares de reflexão em que $k > 2$, $P_k(\theta_i)$ é calculada pela EQ 4.24.

$$P_k(\theta_i) = \frac{1}{2mC} \frac{\cos[(\theta_i + (k-1)\psi]}{\cos(\theta_i + 2k\psi)} \left\{ \frac{1}{\cos[(\theta_i + (k-1)\psi]} \left[\frac{m(C-1)\text{sen}(\theta_i + \psi)}{\text{sen}(\psi)} + m \cos[(\theta_i + (k+1)\psi] - 1 \right] - 2mn^* \right\}$$

$$\alpha_N < \theta_i < \alpha_{N+1} \quad (4.24)$$

$$\text{Onde: } n^* = 2 \sum_{k=5}^{\infty} [\cos(k-3)\psi] + 1$$

4.1.2.3 Estado descendente – contribuição do espelho direito

As expressões analíticas de $P_k(\theta_i)$ para este modo são obtidas de forma similar ao estado ascendente. Porém, são expressas em sua maioria em função dos ângulos β_k .

Neste estado, a radiação que atinge o tubo absorvedor é também dividida em dois grupos. O primeiro considera a radiação que intercepta a linha imaginária l e que tem início em um estado de iluminação de região πr do absorvedor e vai decrescendo até a inexistência de radiação interceptando esta parte do absorvedor. O segundo grupo considera a radiação que não intercepta a linha imaginária l , ou seja, a radiação que seria rejeitada em associações típicas entre cavidades tipo V e módulos fotovoltaicos. Neste último grupo, a radiação ilumina completamente uma região menor que πr do absorvedor e então vai desaparecendo até a completa ausência de luz desta região.

Para modos $k > 0$, em que a radiação intercepta as extremidade de l , o cálculo de $P_k(\theta_i)$, que tem início em um estado completo e vai se extinguindo, é realizado pela EQ 4.25. Esta equação em associações típicas entre cavidades tipo V e sistemas fotovoltaicos descreve um estado completo e não um estado descendente como mostra a configuração proposta.

$$P_k(\theta_i) = \frac{\cos(\theta_i + 2k\psi)}{C \cos \theta_i} \quad \alpha_{k+1} \leq \theta_i \leq \beta_{k-1} \quad (4.25)$$

O cálculo de $P_k(\theta_i)$ para o estado descendente, em que a radiação intercepta a reta l no coletor em V, é realizado pela EQ 4.26. Esta formulação é análoga àquela que representa plenamente o estado de iluminação descendente do absorvedor em associações típicas entre cavidades tipo V e módulos fotovoltaicos.

$$P_k(\theta_i) = \frac{(C-1) \frac{\text{sen}(\beta_k - \psi)}{\cos \theta_i}}{2C \text{sen} \psi} \left[-\frac{\text{sen}(\theta_i - \psi)}{\text{sen}(\beta_k - \psi)} + \frac{\cos(\theta_i + k\psi)}{\cos(\beta_k + k\psi)} \right] \quad \beta_{k-1} \leq \theta_i \leq \beta_k \quad (4.26)$$

A região yr compreendida entre o tubo absorvedor e a superfície refletora (FIG 4.4) pertence ao estado descendente. A função $P_k(\theta_i)$ para esta região pode ser calculada com uma boa aproximação pela EQ 4.26 ou de uma forma exata pela EQ 4.27, que é válida para a radiação que não realiza reflexões da abertura até a reta l .

$$P_k(\theta_i) = \frac{1}{2mC} \left[m - \frac{1}{\cos(\theta_i)} \right] \quad -\psi \leq \theta_i \leq \arccos \left[\frac{1}{m} \right] \quad (4.27)$$

Para a radiação proveniente do segundo grupo considerado no estado descendente, a expressão analítica de $P_k(\theta_i)$ é dada pela EQ 4.28.

$$P_k(\theta_i) = \frac{1}{\cos \theta_i} \left\{ \left[\frac{1}{2mC} (1 + m \cos(\theta_i + 2k\psi)) \right] - \left[\frac{C-1}{2C} \frac{\text{sen}(\theta_i - \psi)}{\cos(\theta_i + (k-1)\psi) \text{sen} \psi} - \frac{n^{***}}{C} \right] \right. \\ \left. \left[\frac{\text{sen}((k+1)\psi)}{\text{sen}(\theta_i + 2k\psi)} - \frac{\text{sen}(\theta_i + (k-1)\psi)}{\text{tg}(\theta_i + 2k\psi)} \right] \right\} \\ \beta_k \leq \theta_i \leq \gamma_k \quad (4.28)$$

Onde: $n^{***} = 1$ para $k = 1$,

$$n^{***} = 2 \sum_3^{\infty} [\cos(k-1)\psi] + 1 \text{ Para modos ímpares de reflexão maiores que } 1$$

e

$$n^{***} = 2 \sum_2^{\infty} \cos(k-1)\psi \text{ Para modos pares de reflexão maiores ou iguais a } 2.$$

A função $P_k(\theta_i)$ expressa pela EQ 4.29 refere-se ao estado descendente, onde pode ocorrer a iluminação máxima de parte do tubo absorvedor pela radiação que seria rejeitada.

$$P_k(\theta_i) = \frac{1}{2\pi C \cos \theta_i} \left[1 + m \cos(\theta_i + 2k\psi) \right] \quad \beta_k \leq \theta_i \leq \delta_k \quad (4.29)$$

4.1.2.4 Contribuição do espelho esquerdo

A parcela da radiação que intercepta o absorvedor realizando sua primeira reflexão no espelho esquerdo dá origem a expressões analíticas $P_k^E(\theta_i)$ relacionadas ao estado completo, ascendente e descendente. Estas expressões são facilmente obtidas a partir das equações anteriores, relativas à contribuição do espelho direito para os três estados. Para obter tais expressões deve se considerar que o modo $k = 0$ está associado exclusivamente ao espelho direito e, desta forma, as expressões para $P_k^E(\theta_i)$ são válidas para $k \geq 1$. Adicionalmente, devido a questões de simetria expressa pela EQ 4.14 é possível obter as expressões analíticas de $P_k^E(\theta_i)$ para a contribuição do espelho esquerdo considerando os três estados de iluminação do absorvedor.

4.1.2.5 Radiação rejeitada pela cavidade – contribuição do espelho direito

Utilizando-se o método das imagens, são obtidas expressões analíticas para a radiação rejeitada pela cavidade. A aplicação deste método é possível devido à avaliação distinta entre modos de reflexão pares ($n = 2k$) e ímpares ($n = 2k+1$) no interior cavidade pela radiação incidente na abertura.

Pode ser considerado que a radiação rejeitada pela cavidade ilumina a abertura da mesma em dois estados: ascendente e descendente. Assim, é observado que os modos pares e ímpares de reflexão contribuem para a iluminação da abertura nestes dois estados.

Partindo dos modos pares de reflexão, a expressão de $P_{2k}(\theta_i)$ para o estado ascendente de iluminação da abertura é obtida pela EQ 4.30.

$$P_{2k} = -\frac{\text{sen}2k\psi}{\text{sen}\psi \cos \theta_i} \cos \left[\theta_i + (2k+1)\psi \right] \quad \delta_k \leq \theta_i \leq \gamma_k \quad (4.30)$$

Para o estado descendente dos modos pares de reflexão da radiação rejeitada, $P_{2k}(\theta_i)$ é calculada com base na EQ 4.31.

$$P_{2k} = \frac{\text{sen}2k\psi}{\text{sen}\psi \cos \theta_i} \cos \left[\theta_i + (2k-1)\psi \right] \quad \gamma_k \leq \theta_i \leq \delta_{k-1} \quad (4.31)$$

Os modos ímpares de reflexão contribuem também para os dois estados de iluminação da abertura. Para o estado ascendente, a expressão de $P_{2k+1}(\theta_i)$ é obtida a partir da EQ 4.32.

$$P_{2k+1} = -\frac{\text{sen} \left[(2k+1)\psi \right]}{\text{sen}\psi \cos \theta_i} \cos \left[\theta_i + 2(k+1)\psi \right] \quad \gamma_{k+1} \leq \theta_i \leq \delta_k \quad (4.32)$$

A expressão $P_{2k+1}(\theta_i)$ para o estado descendente dos modos ímpares de reflexão é dada pela EQ 4.33.

$$P_{2k+1} = -\frac{\text{sen} \left[(2k+1)\psi \right]}{\text{sen}\psi \cos \theta_i} \cos \left[\theta_i + 2k\psi \right] \quad \delta_k \leq \theta_i \leq \gamma_k \quad (4.33)$$

As equações anteriores para radiação rejeitada estão associadas ao espelho direito. A contribuição do espelho esquerdo é obtida a partir da EQ 4.14, que resulta na simples substituição do ângulo θ_i por $-\theta_i$ e o ajuste dos intervalos de domínio angular, feito pelo mesmo princípio.

Devido à complexidade das soluções analíticas de $P_n(\theta_i)$ para o comportamento da radiação rejeitada as expressões mostradas nesta etapa do trabalho se restringem a apresentar as expressões que orientam a definição básica da trajetória da radiação rejeitada (Fraidenraich, 1994).

4.2 Aplicação das soluções analíticas de $P_s(\theta_i)$ para o cálculo das propriedades óticas das cavidades tipo V

A aplicação de cavidades concentradoras tipo V em sistemas de energia solar necessita de um amplo conhecimento das propriedades óticas e radiantes destas cavidades. Para tanto, estas propriedades são calculadas a partir das soluções analíticas $P_n(\theta_i)$. Dentre estas propriedades destacam-se a função de aceitação angular, a eficiência ótica e os coeficientes de troca entre a radiação (EQ 4.43 e 4.44).

A eficiência ótica é calculada com base na EQ 4.2. Entretanto, Fraidenraich (1994) distingue o cálculo da eficiência ótica para radiação direta e difusa. A eficiência ótica para radiação direta é calculada de acordo com a EQ 4.34.

$$\eta_{otb}(\theta_i) = \sum_{s=0}^{M(\theta_i)} P_s(\theta_i) \rho^s \quad (4.34)$$

Para valores em que a refletividade, ρ , das paredes da cavidade tipo V é próxima de 1, Fraidenraich e Almeida (1991) propõem a obtenção de uma equação aproximada da eficiência ótica para radiação direta, denotada por $\eta'_{otb}(\theta_i)$ e expressa pela EQ 4.35.

$$\eta'_{otb}(\theta_i) = F(\theta_i) \rho^{n_N(\theta_i)} \quad (4.35)$$

Onde $F(\theta_i)$ é a função de aceitação angular obtida de acordo com a EQ 4.3 e $n_N(\theta_i)$ o número médio de reflexões que efetivamente atingem o absorvedor calculado com base na EQ 4.36.

$$n_N(\theta_i) = \frac{n(\theta_i)}{F(\theta_i)} \quad (4.36)$$

Onde $n(\theta_i)$ é o número médio de reflexões no interior da cavidade da radiação incidente com o ângulo θ_i que atinge ou não o absorvedor. A função $n(\theta_i)$ está definida pela EQ 4.37.

$$n(\theta_i) = \sum_{s=1}^{M(\theta_i)} P_s(\theta_i) s \quad (4.37)$$

A eficiência ótica para radiação difusa é obtida a partir da integração de $\eta_{otb}(\theta_i)$ para todos os possíveis ângulos de incidência da radiação na abertura da cavidade (EQ 4.38), que pode ser escrita até primeira ordem em $(1-\rho)$ de acordo com a EQ 4.39.

$$\eta_{otd}(\theta_i) = \int_0^{\pi/2} \eta_{otb}(\theta_i) \cos\theta_i d\theta_i \quad (4.38)$$

$$\eta'_{otd}(\theta_i) = F_d(\theta_i) \rho^{n_{dN}(\theta_i)} \quad (4.39)$$

Onde $n_{dN}(\theta_i)$ é o número médio de reflexões da radiação difusa que efetivamente atingem o absorvedor, calculado de acordo com a EQ 4.40.

$$n_{dN}(\theta_i) = \frac{n_d(\theta_i)}{F_d(\theta_i)} \quad (4.40)$$

Onde $n_d(\theta_i)$ é o número médio de reflexões da radiação difusa dentro da cavidade que interceptam ou não o absorvedor, calculado com base na EQ 4.41. $F_d(\theta_i)$ é a função de aceitação angular para a radiação difusa (EQ 4.42).

$$n_d(\theta_i) = \int_0^{\pi/2} n(\theta_i) \cos\theta_i d\theta_i \quad (4.41)$$

$$F_d(\theta_i) = \int_0^{\pi/2} F(\theta_i) \cos\theta_i d\theta_i \quad (4.42)$$

Os coeficientes de troca radiativa entre abertura/absorvedor e entre abertura/abertura são calculados pelas EQ 4.43 e 4.44, respectivamente (Fraidenraich, 1994).

$$E_{Acab} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left[\frac{P_0(\theta_i)}{2} + P_1^D(\theta_i) \rho + \dots + P_N^D(\theta_i) \rho^N \right] \cos\theta_i d\theta_i$$

para $\alpha_{N+1} > \delta_N$ (4.43)

$$E_{AA} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \left[P_1^D(\theta_i) + P_2^D(\theta_i)\rho^2 + \dots + P_{2N}^D(\theta_i)\rho^{2N} \right] \cos \theta_i d\theta_i$$

para $\alpha_{N+1} > \delta_N$ (4.44)

Onde A = abertura da cavidade e cab = comprimento do absorvedor.

4.3 Análise térmica do coletor solar de cavidades tipo V para aquecimento de água

A análise térmica do coletor solar tem como objetivo principal determinar a temperatura de saída do fluido do coletor e a eficiência térmica do equipamento. Isto ocorre a partir da análise e/ou cálculo de vários parâmetros como a incidência e comportamento da radiação solar no coletor, perdas térmicas associadas, propriedades dos materiais que compõem o coletor solar e de entrada do fluido no coletor, energia útil a ser transferida para o fluido, aspectos construtivos do equipamento, entre outros.

4.3.1 Perdas térmicas associadas ao coletor e a energia útil

As perdas térmicas que ocorrem no coletor são de extrema importância para quantificar a energia útil transferida para o líquido a ser aquecido. Estas perdas ocorrem devido à presença de fenômenos de convecção, radiação e condução associados aos componentes do coletor.

A cobertura de vidro situada na abertura da cavidade é necessária para evitar perdas térmicas por convecção forçada que poderiam ocorrer pela passagem de massas de ar em movimento nas proximidades do coletor, ou por convecção livre do ar inicialmente em repouso na superfície do tubo absorvedor. Para a associação entre cavidades tipo V e módulos fotovoltaicos estudados por Fraidenraich (1994) a ausência da cobertura de vidro na abertura da cavidade e a presença de extremidades livres para a circulação atmosférica constituem uma estruturação benéfica para o funcionamento do sistema. Tal fato se deve à queda de eficiência destas células quando a temperatura do módulo é elevada (Gnoatto *et al.*, 2008). Esta queda no desempenho pode ser minimizada pela transferência de calor por convecção entre o módulo e o ar na sua superfície. Porém, coberturas de material transparente também promovem perdas térmicas através da absorção e reflexão da radiação incidente em sua superfície voltada para atmosfera. A fração da radiação direta incidente sobre a área da

cobertura de uma cavidade tipo V e absorvida por ela foi obtida por Hsieh (1981) e foi adaptada para cavidades tipo V associadas a tubos (EQ 4.45).

$$q_{b,c} = q_b \left[\alpha_c + \bar{\alpha}_c \tau_c \bar{\rho}_a \bar{\rho}_{esp}^{2\bar{n}} \right] \frac{Área_c}{Área_a} \quad (4.45)$$

Onde q_b é a componente direta do fluxo de radiação, função que depende do ângulo de incidência da radiação; α , τ e ρ são a absorvidade, transmissividade e refletividade, respectivamente; $\bar{\alpha}_c$ a absorvidade relativa à componente difusa da radiação em relação à cobertura, indicada pelo subscrito c ; $\bar{\rho}_a$ a refletividade relativa à componente difusa da radiação em relação ao absorvedor, indicado pelo subscrito a ; $\bar{\rho}_{esp}^{2\bar{n}}$ a refletividade das superfícies refletoras do CPC, no caso espelho designado pelo subscrito esp e \bar{n} o número médio de reflexões para os raios incidentes na abertura com metade do ângulo de aceite; $Área_a$ e $Área_c$ são as áreas do absorvedor e da cobertura, respectivamente.

Na EQ 4.45, o termo $q_b \alpha_c \bar{Área}_c / \bar{Área}_a$ representa a fração da radiação que é absorvida diretamente pela cobertura. O termo $q_b \bar{\alpha}_c \tau_c \bar{\rho}_a \bar{\rho}_{esp}^{2\bar{n}} \bar{Área}_c / \bar{Área}_a$ refere-se à fração da radiação direta que é transmitida através da cobertura, refletida pelo absorvedor e então absorvida pelo lado da cobertura voltado para o tubo absorvedor.

O fluxo de calor devido à componente direta da radiação que é transmitida através da cobertura e atinge o tubo absorvedor, sendo por este absorvida, pode ser obtido segundo Leão (1989) pela EQ 4.46.

$$q_{b,a} = q_b \tau_c \eta_{otb} \left[\alpha_a + \bar{\alpha}_a \bar{\rho}_a \bar{\rho}_c \bar{\rho}_{esp}^{2\bar{n}} \frac{Área_a}{Área_c} \right] \frac{Área_c}{Área_a} \quad (4.46)$$

Onde: η_{otb} refere-se à eficiência ótica para a radiação direta da cavidade tipo V para um determinado ângulo de incidência da radiação; τ_c a transmissividade do material com o qual a cobertura é feita; $\bar{\alpha}_a$ e $\bar{\rho}_a$ constituem a absorvidade e a refletividade, respectivamente, relativas à radiação difusa do material que constituem o tubo absorvedor.

Na EQ 4.46, o termo $q_b \tau_c \eta_{otb} \alpha_a \bar{Área}_c / \bar{Área}_a$ corresponde à fração da radiação direta que é transmitida pela cobertura, refletida pela superfície refletora e absorvida

diretamente pelo absorvedor. Já o termo $q_b \tau_c \eta_{otb} \bar{\alpha}_a \bar{\rho}_a \bar{\rho}_c \rho_{esp}^{2\bar{n}}$ representa a fração da energia direta que é transmitida pela cobertura, refletida pelas superfícies refletoras, refletida pelo absorvedor, refletida novamente pelas superfícies refletoras e pela cobertura e por último absorvida pelo tubo absorvedor.

Para a radiação difusa absorvida pela cobertura e pelo tubo absorvedor, podem ser obtidas expressões análogas às obtidas para a radiação direta (EQ 4.47 e 4.48).

$$q_{d,c} = q_d \bar{\alpha}_c \left[1 + \bar{\tau}_c \bar{\rho}_a \rho_{esp}^{2\bar{n}} \right] \frac{\text{Área}_c}{\text{Área}_a} \quad (4.47)$$

$$q_{d,a} = q_d \bar{\tau}_c \eta_{otd} \bar{\alpha}_a \left[1 + \bar{\rho}_a \bar{\rho}_c \rho_{esp}^{2\bar{n}} \frac{\text{Área}_a}{\text{Área}_c} \right] \frac{\text{Área}_a}{\text{Área}_c} \frac{\text{Área}_c}{\text{Área}_a} \quad (4.48)$$

Nas EQ 4.47 e 4.48 o termo $\frac{\text{Área}_a}{\text{Área}_c}$ inserido, corresponde ao fator de forma.

Além da energia absorvida pela cobertura e pelo tubo, ocorrem perdas térmicas por convecção e radiação que devem ser avaliadas para o cálculo da energia útil a ser transferida ao fluido que escoar no interior do absorvedor. Para uma melhor compreensão e quantificação da energia térmica perdida e da energia útil para o aquecimento da água, foi desenvolvido um circuito térmico análogo ao proposto por Hsieh (1981) e Leão (1989). O circuito térmico para o coletor composto por cavidades tipo V para cobertura de vidro é apresentado pela FIG 4.14.

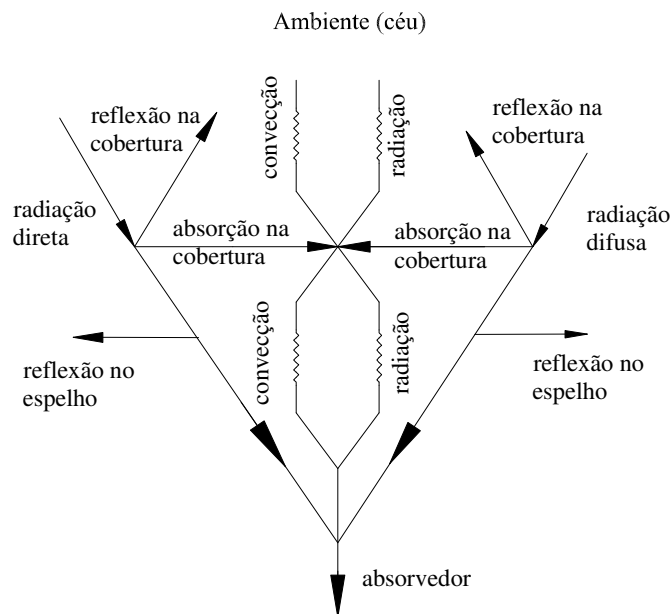


FIGURA 4.14 – Circuito térmico do coletor solar composto por cavidades V.

FONTE – Adaptado de Hsieh (1981).

Na FIG 4.14, além das perdas térmicas relativas ao absorvedor, são mostradas também as perdas relativas à cobertura e à reflexão da radiação nas superfícies refletoras.

A quantificação da energia perdida é obtida. Para a energia trocada entre o tubo absorvedor e a cobertura pode ser adaptado de Incropera e Witt (1992) a seguinte metodologia de cálculo expressa pela EQ 4.49.

$$q_{RAD_{a,c}} = \frac{\sigma(T_a^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\varepsilon_a} + \left(\frac{Área_a}{Área_c}\right)\left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1\right)} \quad (4.49)$$

Onde: σ é a constante de Stefan-Boltzmann; T_a e T_c são as temperaturas médias representativas do tubo e da cobertura, respectivamente; ε_a e ε_c são as emissividades do tubo e da cobertura, respectivamente.

O calor perdido da cobertura do coletor para o céu pode ser calculado pela EQ 4.50 (Hsieh, 1981).

$$q_{RAD_{c,céu}} = \varepsilon_c \sigma (T_c^4 - T_{c\acute{e}u}^4) \left(\frac{Área_c}{Área_a}\right) \quad (4.50)$$

Onde $T_{c\acute{e}u}$ é a temperatura do céu, que pode ser relacionada com a temperatura ambiente, T_{amb} , de acordo com a EQ 4.51 (Duffie e Beckman, 1980, citado por Leão, 1989).

$$T_{c\acute{e}u} = 0,0552(T_{amb})^{1,5} \quad (4.51)$$

Com $T_{c\acute{e}u}$ e T_{amb} em Kelvin.

A perda de calor do absorvedor por convecção no interior da cavidade é calculada segundo Hsieh (1981) de acordo com a EQ 4.52.

$$q_{CONV_{a,c}} = h_{a,c} \Delta T \left(\frac{Área_c}{Área_a}\right) \quad (4.52)$$

Onde: $h_{a,c}$ representa o coeficiente de transferência de calor por convecção e calculado pela EQ 4.53.

$$h_{a,c} = 3,25 + 0,0085 \frac{T_a - T_c}{4r} \quad (4.53)$$

Onde r é o raio externo do tubo absorvedor.

A perda de energia por convecção entre a cobertura e o ambiente é calculada pela EQ 4.54 (Hsieh, 1981).

$$q_{CONV_{c,amb}} = h_{c,amb} (T_c - T_{amb}) \left(\frac{Área_c}{Área_a} \right) \quad (4.54)$$

Onde $h_{c,amb}$ é o coeficiente de transferência de calor por convecção e calculado segundo pela EQ 4.55 (McAdams, 1954, citado por Duffie e Beckman, 1991).

$$h_{c,amb} = 5,7 + 3,8V \quad (4.55)$$

Em que V é a velocidade do vento em m/s , e $h_{cob,amb}$ é dado em W/m^2K .

A quantidade de calor que pode ser extraída pelo fluido que escoar no interior dos tubos absorvedores pode ser obtida a partir da EQ 4.56 (Hsieh, 1981).

$$Q_{\acute{U}TIL} = \dot{m}c_p (T_{saída} - T_{entrada}) \cong U_{alf} A_a \left(T_a - \frac{T_{entrada} + T_{saída}}{2} \right) \quad (4.56)$$

Onde $T_{saída}$ e $T_{entrada}$ são as temperaturas de saída e entrada da água no coletor; \dot{m} é a vazão mássica da água no equipamento em kg/s ; c_p calor específico da água a pressão constante em $kJ/kg.K$; A_a é a área externa do tubo absorvedor igual a $2\pi r_{externo} L_{coletor}$; U_{alf} é o coeficiente global que relaciona a condução através da parede do tubo absorvedor e a convecção para o fluido que escoar no interior deste absorvedor (FIG 4.15).

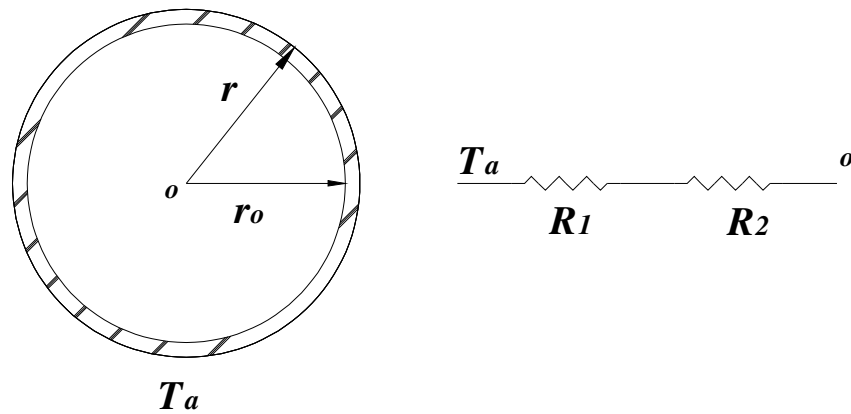


FIGURA 4.15 – Tubo absorvedor e circuito térmico correspondente, com

$$R_1 = \frac{A_a \ln\left(\frac{r}{r_o}\right)}{2\pi k_a L} \text{ e } R_2 = \frac{A_a}{h_i A_i}.$$

FONTE - Adaptado de Leão (1989).

Na EQ 4.56 foi realizada uma aproximação para obtenção do termo a direita desta equação, de forma a facilitar a solução por métodos numéricos. Por este motivo, entende-se que T_a constitui uma temperatura média representativa do absorvedor.

O coeficiente global, $U_{a/f}$, pode ser obtido pela EQ 4.57 em função da área externa do tubo absorvedor.

$$U_{a/f} = \left[\frac{A_a \ln\left(\frac{r}{r_o}\right)}{2\pi k_a L} + \frac{A_a}{h_i A_i} \right]^{-1} \quad (4.57)$$

Onde r_o é o raio interno do tubo absorvedor; L o comprimento do coletor em metros; k_a é condutividade térmica do material que constitui o tubo absorvedor em W/mK ; A_i a área interna do tubo absorvedor obtida pela EQ 4.58.

$$A_i = 2\pi r_o L \quad (4.58)$$

Na EQ 4.57 o primeiro termo entre colchetes corresponde à resistência condutiva da parede do tubo absorvedor. O segundo termo desta equação é relativo à resistência convectiva absorvedor-fluido. Neste último termo, h_i corresponde ao coeficiente convectivo e é obtido de acordo com a EQ 4.59.

$$h_i = \frac{Nu k_f}{D_H} \quad (4.59)$$

Considerando escoamento laminar completamente desenvolvido e na condição de temperatura de parede constante do tubo absorvedor, foi definido $Nu = 4,364$ (Burmeister, 1993). D_H é o diâmetro hidráulico igual a $2r_o$ e k_f a condutividade térmica do fluido em W/mK .

As equações anteriormente apresentadas relativas à absorção de radiação pela cobertura, tubo absorvedor, fluido a ser aquecido, bem como as perdas térmicas, são utilizadas para compor o balanço de energia, em regime permanente para a cobertura e o tubo absorvedor através das EQ 4.60 e 4.61, respectivamente.

$$q_{b,c} + q_{d,c} + q_{RAD_{a,c}} + q_{CONV_{a,c}} - q_{RAD_{c,céu}} - q_{CONV_{c,amb}} = 0 \quad (4.60)$$

$$q_{b,a} + q_{d,a} - q_{RAD_{a,c}} - q_{CONV_{a,c}} - \frac{Q_{\acute{U}TIL}}{A_a} = 0 \quad (4.61)$$

As EQ 4.56, EQ 4.60 e 4.61, formam um sistema de três equações não lineares que pode ser solucionado por métodos iterativos em que se conhecendo a temperatura de entrada da água no coletor, $T_{entrada}$, determina-se $T_{saída}$, T_a e T_c .

A eficiência térmica instantânea do coletor é dada pela EQ 4.62.

$$\eta_{térmica} = \frac{Q_{\acute{U}TIL}}{I_T A_{col}} \quad (4.62)$$

Onde I_T é a radiação total incidente na abertura do coletor, composta pela soma das componentes direta e difusa de radiação; A_{col} é a área do coletor composto por cavidades tipo V.

5. METODOLOGIA.

5.1 Considerações iniciais

A metodologia de análise do modelo matemático abrange os seguintes procedimentos:

- Implementação do algoritmo computacional referente à modelagem matemática do coletor solar composto de cavidades V;
- Definição da eficiência ótica para radiação direta e difusa das cavidades tipo V associadas a tubos absorvedores próximos ao vértice;
- Avaliação da radiação solar que intercepta o coletor, considerando as características meteorológicas no local geográfico de funcionamento do sistema para equinócios e solstícios, incluindo a obtenção da inclinação ótima do coletor nas datas consideradas e a avaliação da radiação no plano de inclinação do coletor;
- Avaliação da funcionalidade de várias configurações do coletor de acordo com o modelo matemático, considerando as perdas térmicas, energia útil absorvida, a temperatura de saída da água no coletor e a eficiência térmica instantânea do sistema;
- Realização de uma análise de custo de forma comparando o coletor composto por cavidades tipo V a coletores solares planos comerciais para definição de uma configuração mais adequada do coletor proposto.

5.2 Propriedades óticas das cavidades tipo V

Esta avaliação teve por base parâmetros físicos das cavidades tipo V, em correspondência com as dimensões previstas para o coletor solar estudado. Para isto, foi realizada uma análise gráfica prévia ao dimensionamento das cavidades tipo V para tal aplicação. Em geral, todo estudo e aplicação de cavidades tipo V deve ser precedido por uma análise gráfica destas cavidades. Isto se deve principalmente à metodologia de obtenção das expressões analíticas de $P_s(\theta_i)$, em que são utilizados fundamentos de geometria plana e trigonometria aplicadas a triângulos quaisquer.

Iniciando-se do princípio mencionado no parágrafo anterior, a obtenção das expressões analíticas de $P_s(\theta_i)$ ocorreu partindo-se de uma análise gráfica para o diâmetro de

tubos utilizados em coletores comerciais (15 mm). Em seguida foi avaliado um intervalo para verificação dos possíveis semi-ângulos do vértice, ψ , de acordo com trabalhos já desenvolvidos. Fraidenraich (1994) utilizou cavidades tipo V com relação custo benefício favorável de superfícies refletoras ($25^\circ < \psi < 30^\circ$). Em outro estudo, este mesmo autor avaliou cavidades V com $20^\circ < \psi < 40^\circ$ (Fraidenraich, 1998). Entretanto, o intervalo avaliado no presente trabalho foi $25^\circ \leq \psi \leq 41^\circ$ para que não fosse muito oneroso o coletor proposto. Na análise gráfica foi obtido o número máximo de reflexões para radiação aceita nas cavidades em relação ao intervalo determinado para os semi-ângulos vértice (obtendo-se duas reflexões reais no máximo).

A razão de concentração (C) por ser independente do semi-ângulo do vértice, foi predeterminada considerando valores de 2,0, 2,8, 4,0 e 4,4. Com tais valores atribuídos a razão de concentração, o número de tubos no coletor composto por cavidades V é comparável a coletores planos do tipo placa e tubos disponíveis no mercado.

Com a verificação prévia das cavidades V a serem empregadas, foram utilizadas expressões analíticas de $P_s(\theta_i)$, correspondentes aos estados de iluminação do absorvedor e máximo modo de reflexão no interior da cavidade (para ângulos de incidência da radiação variando de 0° a 60° a partir do meio dia solar para determinação da temperatura de saída da água do coletor). Esta consideração abrange aproximadamente 8 horas diária de funcionamento do sistema, quando aplicadas as condições de simetria entre os espelhos direito e esquerdo mostrada pela EQ 4.14. A expressão analítica de $P_s(\theta_i)$ para o estado completo de iluminação do absorvedor utilizada corresponde a EQ 4.17, que por questões de simplicidade teve sua região yr reduzida com base no parâmetro a de forma que esta equação teve seu intervalo angular igual a $(-\psi, \psi)$. O parâmetro a foi obtido considerando a viabilidade construtiva de projeto, mantendo-se o tubo absorvedor afastado das superfícies refletoras de 1 mm. Após a definição de a , y foi obtido através da EQ 4.19, e em seguida $m = (I + y)$. Para o estado ascendente de iluminação do absorvedor foram utilizadas as EQ 4.20, 4.21 e 4.22 em seus intervalos angulares correspondentes para o espelho direito. O estado descendente foi avaliado pelas EQ 4.25, 4.26, 4,27 e 4,28 com seus correspondentes intervalos angulares de domínio.

As eficiências óticas, para a radiação direta e difusa, foram obtidas a partir das expressões analíticas de $P_s(\theta_i)$ para o intervalo de incidência da radiação considerado. Estas eficiências foram obtidas pelas EQ 4.34 e 4.38. O ângulo de incidência da radiação foi obtido através da EQ 5.1 (considerando $\lambda = 180^\circ$, hemisfério sul) e o intervalo $0^\circ \leq \omega \leq 60^\circ$.

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \operatorname{sen} v \operatorname{sen} \phi \cos \mu - \operatorname{sen} v \cos \phi \operatorname{sen} \mu \cos \lambda + \cos v \cos \phi \cos \mu \cos \omega \\ & + \cos v \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \mu \cos \lambda \cos \omega + \cos v \operatorname{sen} \mu \operatorname{sen} \lambda \operatorname{sen} \omega \end{aligned} \quad (5.1)$$

Onde μ é a inclinação do coletor; ϕ a latitude; ω o ângulo horário; λ o azimute de superfície; v a declinação obtida de acordo com a equação de Cooper (1969) citado por Duffie e Beckman (1991) e apresentada aqui pela EQ 5.2.

$$v = 23,45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284 + (\text{dia do ano})}{365} \right) \quad (5.2)$$

O dia do ano na EQ 5.2 é obtido conforme recomendado por Duffie e Beckman (1991) de acordo com a TAB 5.1.

TABELA 5.1
Dia médio recomendado para o mês e os valores dos dias do ano para cada mês

Mês	i para o -iésimo dia do mês	O dia médio do mês		
		data	dia do ano	v , Declinação (°)
Janeiro	i	17	17	-20,9
Fevereiro	$31+i$	16	47	-13,0
Março	$59+i$	16	75	-2,4
Abril	$90+i$	15	105	9,4
Maio	$120+i$	15	135	18,8
Junho	$151+i$	11	162	23,1
Julho	$181+i$	17	198	21,2
Agosto	$212+i$	16	228	13,5
Setembro	$243+i$	15	258	2,2
Outubro	$273+i$	15	288	-9,6
Novembro	$304+i$	14	318	-18,9
Dezembro	$334+i$	10	344	-23,0

FONTE – adaptado de Duffie e Beckman (1991).

5.3 Avaliação da radiação solar incidente sobre o coletor

Os dados solarimétricos adotados neste trabalho referem-se à radiação solar diária média mensal em um plano horizontal para a cidade de Belo Horizonte/MG, extraídos de Guimarães (1995), e são apresentados na TAB 5.2.

TABELA 5.2
Planilha de Insolação para Belo Horizonte

Mês	Y (horas)	H_0 (MJ /m ²)	y (horas)	H (MJ /m ²)	K_t Mensal
jan/86	13,06	41,51	6,12	18,96	0,46
fev/93	12,66	39,91	5,66	17,77	0,45
mar/89	12,12	36,41	7,05	18,62	0,51
abr/87	11,53	31,29	7,08	16,49	0,53
mai/91	11,05	26,46	7,25	14,53	0,55
jun/88	10,81	24,00	8,06	14,52	0,60
jul/88	10,93	25,01	8,63	15,99	0,64
ago/92	11,34	29,07	7,10	15,50	0,53
set/87	11,90	34,27	6,04	16,32	0,48
out/90	12,48	38,57	6,98	19,32	0,50
nov/87	12,96	40,98	5,90	18,43	0,45
dez/89	13,19	41,81	5,12	17,15	0,41

FONTE – Adaptado de Guimarães (1995).

Na TAB 5.2, Y é o número de horas de brilho solar máximo, y o número de horas de brilho solar real, H_0 a radiação solar extraterrestre diária média mensal, H a radiação solar diária média mensal e K_t o índice de transparência da atmosfera.

Os dados da TAB 5.2 são usados para avaliar a radiação solar que atinge a abertura da cavidade tipo V e a transferência de calor para tubo absorvedor. Para isto, a radiação solar apresentada nesta tabela deve ser convertida em radiação total horária média mensal e em seguida em suas componentes direta e difusa. De acordo com Duffie e Beckman (1991) a avaliação do desempenho de coletores solares deve ocorrer em intervalos curtos de tempo, hora por hora ou em intervalos menores. A obtenção da radiação horária média mensal a partir da radiação diária média mensal ocorre de acordo com a metodologia proposta por Collares-Pereira e Rabl (1979) citados por Duffie e Beckman (1991) através das EQ 5.3 a 5.7.

$$r_t = \frac{I}{H} \quad (5.3)$$

Onde r_t é a razão entre I , a radiação total média horária (insolação), e H .

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\text{sen} \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (5.4)$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \text{sen}(\omega_s - 60) \quad (5.5)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \text{sen}(\omega_s - 60) \quad (5.6)$$

Sendo ω_s o deslocamento angular do sol em seu poente, obtido pela EQ 5.7.

$$\cos(\omega_s) = -\tan(\phi) \tan(\nu) \quad (5.7)$$

A componente difusa da radiação solar horária média mensal a partir da componente difusa da radiação diária média mensal pode ser calculada pelas EQ 5.8 e 5.9.

$$r_d = \frac{I_d}{H_d} \quad (5.8)$$

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\text{sen} \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (5.9)$$

Collares-Pereira e Rabl (1979) citados por Duffie e Beckman (1991) propõem a seguinte correlação para a obtenção de H_d , componente difusa da radiação solar diária média mensal, a partir de K_t .

$$\frac{H_d}{H} = \left\{ \begin{array}{ll} 0,99 & \text{para } K_t \leq 0,17 \\ 1,188 - 2,272K_t + 9,473K_t^2 - 21,865K_t^3 + 14,648K_t^4 & \text{para } 0,17 < K_t < 0,75 \\ -0,54K_t + 0,632 & \text{para } 0,75 < K_t < 0,80 \\ 0,2 & \text{para } K_t \geq 0,80 \end{array} \right\} \quad (5.10)$$

A componente direta da radiação total horária média mensal, em MJ/m², pode ser obtida subtraindo-se a radiação total nesta mesma base de tempo pela componente difusa (EQ 5.11).

$$I_b = I - I_d \quad (5.11)$$

onde os subscritos *b* e *d* denotam a radiação direta e difusa respectivamente.

Os valores da radiação horária média mensal, componentes direta e difusa, são apresentados na TAB 5.3, para o plano horizontal na cidade de Belo Horizonte.

TABELA 5.3

Insolação horária média mensal no plano horizontal para a cidade de Belo Horizonte

w (ângulo horário, em °)	equinócio do outono		solstício de inverno		equinócio de primavera		solstício de verão	
	I_d (MJ/m ²)	I_b (MJ/m ²)	I_d (MJ/m ²)	I_b (MJ/m ²)	I_d (MJ/m ²)	I_b (MJ/m ²)	I_d (MJ/m ²)	I_b (MJ/m ²)
0	1,390	1,200	0,923	1,558	1,402	0,945	1,421	0,620
2,5	1,390	1,199	0,923	1,556	1,402	0,944	1,420	0,620
5	1,388	1,195	0,921	1,551	1,400	0,940	1,419	0,617
7,5	1,386	1,188	0,919	1,542	1,398	0,934	1,416	0,613
10	1,382	1,178	0,917	1,530	1,394	0,926	1,413	0,607
12,5	1,378	1,166	0,913	1,515	1,389	0,915	1,409	0,599
15	1,373	1,151	0,909	1,497	1,384	0,902	1,404	0,590
17,5	1,366	1,134	0,904	1,476	1,377	0,886	1,398	0,580
20	1,359	1,115	0,899	1,452	1,370	0,869	1,392	0,568
22,5	1,352	1,093	0,893	1,425	1,362	0,850	1,384	0,554
25	1,343	1,069	0,887	1,395	1,354	0,829	1,377	0,540
27,5	1,334	1,044	0,880	1,364	1,344	0,806	1,368	0,524
30	1,325	1,016	0,873	1,331	1,335	0,781	1,359	0,507
32,5	1,315	0,988	0,865	1,295	1,325	0,756	1,350	0,489
35	1,305	0,957	0,858	1,259	1,314	0,729	1,341	0,470
37,5	1,295	0,926	0,850	1,221	1,304	0,701	1,331	0,450
40	1,285	0,894	0,843	1,182	1,293	0,672	1,321	0,429
42,5	1,274	0,860	0,835	1,142	1,283	0,642	1,312	0,408
45	1,265	0,826	0,828	1,102	1,273	0,611	1,302	0,386
47,5	1,256	0,792	0,822	1,062	1,264	0,581	1,293	0,364
50	1,247	0,757	0,816	1,022	1,255	0,549	1,284	0,341
52,5	1,239	0,722	0,811	0,982	1,247	0,518	1,276	0,319
55	1,232	0,687	0,807	0,942	1,241	0,486	1,269	0,295
57,5	1,227	0,653	0,804	0,903	1,235	0,454	1,263	0,272
60	1,223	0,618	0,802	0,865	1,231	0,422	1,258	0,248

Considerando o modelo de céu isotrópico proposto por Liu e Jordan (1963) citado por Duffie e Beckman (1991), a radiação que atinge a superfície do coletor inclinado pode ser quantificada para esta superfície inclinada pela EQ. 5.12.

$$I_{incl} = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \mu}{2} \right) + \rho_g (I_b + I_d) \left(\frac{1 - \cos \mu}{2} \right) \quad (5.12)$$

A EQ 5.12 fornece a radiação solar total sobre a superfície inclinada para uma dada hora solar considerando as componentes direta, difusa e devido ao albedo, representadas pelo primeiro, segundo e terceiro termo, respectivamente. O fator geométrico, R_b , é definido como a razão entre a radiação direta sobre uma superfície inclinada pela radiação sobre uma

superfície horizontal em um mesmo intervalo de tempo. Este fator é obtido através da EQ 5.13, considerando o hemisfério sul (Duffie e Beckman, 1991).

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \mu) \cos \nu \cos \omega + \sin(\phi + \mu) \sin \nu}{\cos \phi \cos \nu \cos \omega + \sin \phi \sin \nu} \quad (5.13)$$

Na obtenção de R_b , a latitude considerada foi de $-19,9^\circ$, referente à cidade de Belo Horizonte, Brasil. As inclinações do coletor para os dias de equinócios e solstícios foram obtidas proporcionando-se a incidência da radiação solar igual a 90° no plano do coletor ao meio dia solar. Estas inclinações são apresentadas na TAB 5.4 abaixo.

TABELA 5.4
Inclinação do coletor para os dias de equinócio e solstício

Período considerado	Mês	Dia	Inclinação do coletor(μ)
Equinócio de Outono	Março	21	$19,5^\circ$ Voltado para o hemisfério norte
Solstício de Inverno	Junho	21	$43,35^\circ$ Voltado para o hemisfério norte
Equinócio de Primavera	Setembro	23	$18,89^\circ$ Voltado para o hemisfério norte
Solstício de Verão	Dezembro	21	$3,55^\circ$ Voltado para o hemisfério sul

As declinações obtidas para os dias referentes aos equinócios e solstícios são mostradas na TAB 5.5.

TABELA 5.5
Declinação para os dias de equinócio e solstício do ano de 2007

Ano – 2007	Mês	Dia	ν , Declinação
Equinócio de Outono	Março	21	0
Solstício de Inverno	Junho	21	23,45
Equinócio de Primavera	Setembro	23	0
Solstício de Verão	Dezembro	21	-23,45

A partir das TAB 5.4 e 5.5 foram avaliadas as componentes direta e difusa da radiação para o coletor inclinado, desprezando-se a parcela da radiação devido ao albedo. Estas componentes são apresentadas na TAB 5.6.

TABELA 5.6

Insolação horária média mensal no plano do coletor com inclinações ótimas para os equinócios e solstícios para a cidade de Belo Horizonte

w	equinócio do outono		solstício de inverno		equinócio de primavera		solstício de verão	
	$I_{d;incl}$ (MJ/m ²)	$I_{d;incl}$ (MJ/m ²)	$I_{d;incl}$ (MJ/m ²)	$I_{d;incl}$ (MJ/m ²)	$I_{d;incl}$ (MJ/m ²)	$I_{d;incl}$ (MJ/m ²)	$I_{d;incl}$ (MJ/m ²)	$I_{d;incl}$ (MJ/m ²)
0	1,35	1,273	0,7971	2,143	1,364	0,9988	1,42	0,6212
2,5	1,35	1,272	0,7971	2,14	1,364	0,9977	1,419	0,6212
5	1,348	1,268	0,7954	2,136	1,362	0,9935	1,418	0,6182
7,5	1,346	1,26	0,7936	2,127	1,36	0,9871	1,415	0,6143
10	1,342	1,25	0,7919	2,115	1,356	0,9786	1,412	0,6084
12,5	1,338	1,237	0,7885	2,101	1,352	0,967	1,408	0,6005
15	1,334	1,221	0,785	2,084	1,347	0,9531	1,403	0,5916
17,5	1,327	1,203	0,7807	2,064	1,34	0,9362	1,397	0,5817
20	1,32	1,183	0,7764	2,041	1,333	0,9181	1,391	0,5699
22,5	1,313	1,159	0,7712	2,016	1,325	0,8979	1,383	0,5561
25	1,304	1,134	0,766	1,988	1,318	0,8757	1,376	0,5423
27,5	1,296	1,107	0,76	1,96	1,308	0,8512	1,367	0,5265
30	1,287	1,077	0,7539	1,931	1,299	0,8247	1,358	0,5097
32,5	1,277	1,048	0,747	1,899	1,289	0,7981	1,349	0,4919
35	1,268	1,015	0,741	1,869	1,279	0,7695	1,34	0,4732
37,5	1,258	0,9817	0,7341	1,838	1,269	0,7397	1,33	0,4534
40	1,248	0,9477	0,728	1,807	1,258	0,709	1,32	0,4327
42,5	1,237	0,9115	0,7211	1,777	1,248	0,6771	1,311	0,4119
45	1,229	0,8753	0,7151	1,75	1,239	0,6442	1,301	0,3902
47,5	1,22	0,8392	0,7099	1,726	1,23	0,6123	1,292	0,3684
50	1,211	0,8019	0,7047	1,706	1,221	0,5783	1,283	0,3457
52,5	1,203	0,7647	0,7004	1,69	1,213	0,5454	1,275	0,3239
55	1,197	0,7274	0,6969	1,681	1,208	0,5114	1,268	0,3001
57,5	1,192	0,6912	0,6943	1,681	1,202	0,4774	1,262	0,2773
60	1,188	0,654	0,6926	1,693	1,198	0,4434	1,257	0,2534

Com a inclinação recomendada pela norma NBR 12269 de 2006, latitude local acrescida de 10°, foram redefinidos novos valores de insolação a partir da TAB 5.2 em uma metodologia similar à obtenção da insolação apresentada na TAB 5.6. Com base nesta, a inclinação utilizada foi de 30°. Estes resultados são apresentados na TAB 5.7.

TABELA 5.7

Insolação horária média mensal no plano do coletor com inclinação igual a 30° referente à cidade de Belo Horizonte

w	equinócio do outono		solstício de inverno		equinócio de primavera		solstício de verão	
	$I_{d;incl}$ (MJ/m ²)	$I_{d;incl}$ (MJ/m ²)	$I_{d;incl}$ (MJ/m ²)	$I_{d;incl}$ (MJ/m ²)	$I_{d;incl}$ (MJ/m ²)	$I_{d;incl}$ (MJ/m ²)	$I_{d;incl}$ (MJ/m ²)	$I_{d;incl}$ (MJ/m ²)
0	1,297	1,252	0,8612	2,085	1,308	0,9801	1,326	0,5177
2,5	1,297	1,251	0,8612	2,082	1,308	0,979	1,325	0,5176
5	1,295	1,246	0,8593	2,077	1,306	0,9749	1,324	0,5148
7,5	1,293	1,239	0,8574	2,068	1,304	0,9686	1,321	0,5109
10	1,289	1,229	0,8556	2,055	1,301	0,9602	1,318	0,5051
12,5	1,286	1,216	0,8518	2,04	1,296	0,9488	1,315	0,4975
15	1,281	1,2	0,8481	2,021	1,291	0,9352	1,31	0,4889
17,5	1,274	1,183	0,8434	2	1,285	0,9185	1,304	0,4792
20	1,268	1,163	0,8388	1,975	1,278	0,9007	1,299	0,4677
22,5	1,261	1,14	0,8332	1,948	1,271	0,8809	1,291	0,4543
25	1,253	1,115	0,8276	1,917	1,263	0,8589	1,285	0,4408
27,5	1,245	1,088	0,8211	1,886	1,254	0,8349	1,276	0,4255
30	1,236	1,059	0,8145	1,854	1,246	0,8088	1,268	0,4093
32,5	1,227	1,03	0,8071	1,819	1,236	0,7827	1,26	0,3921
35	1,218	0,9974	0,8005	1,785	1,226	0,7545	1,251	0,374
37,5	1,208	0,9649	0,7931	1,749	1,217	0,7252	1,242	0,355
40	1,199	0,9314	0,7865	1,714	1,206	0,6949	1,233	0,3352
42,5	1,189	0,8958	0,7791	1,678	1,197	0,6636	1,224	0,3153
45	1,18	0,8602	0,7725	1,645	1,188	0,6312	1,215	0,2946
47,5	1,172	0,8246	0,7669	1,614	1,179	0,5998	1,206	0,2739
50	1,163	0,7879	0,7613	1,586	1,171	0,5664	1,198	0,2524
52,5	1,156	0,7512	0,7567	1,561	1,163	0,534	1,191	0,2318
55	1,149	0,7146	0,7529	1,541	1,158	0,5005	1,184	0,2098
57,5	1,145	0,6789	0,7501	1,528	1,152	0,467	1,178	0,1887
60	1,141	0,6422	0,7483	1,524	1,149	0,4335	1,174	0,1671

5.4 Comportamento térmico do coletor solar composto por cavidades V

A energia útil a ser transferida para a água que escoar no interior dos tubos absorvedores foi obtida pelo sistema de equações não lineares formado pela associação entre as EQ 4.60 e 4.61, combinadas com a EQ 4.56. Este sistema, originado pelo balanço de energia da cobertura e do absorvedor em regime permanente, foi resolvido pelo programa EES a partir de rotinas internas envolvendo métodos iterativos desenvolvidos exclusivamente para o software.

Os resultados relativos à energia absorvida pela cobertura (EQ 4.45 e EQ 4.47) e pelo absorvedor (EQ 4.46 e EQ 4.48) foram gerados a partir do fluxo de radiação no coletor

(TAB 5.6) e das propriedades dos materiais que constituem os componentes do sistema. Estas propriedades são apresentadas no Apêndice C. Este fluxo de radiação foi obtido dividindo as componentes da radiação horária média mensal (TAB 5.6) pelo intervalo de tempo específico relativo ao fluxo, em que houve a conversão de MJ/m² para W/m², ou seja, converteu-se insolação em irradiância. Adicionalmente, o coletor composto por cavidades tipo V teve seu desempenho térmico avaliado para inclinação do coletor igual a 30°, cuja insolação é apresentada na TAB 5.7.

A temperatura de entrada da água no coletor, $T_{entrada}$, é um parâmetro importante para definição da temperatura de saída da água deste mesmo equipamento. Através do sistema de três equações não lineares discutido, é possível a avaliação desta temperatura de saída da água do coletor proposto. Esta temperatura, $T_{saída}$, foi avaliada para diferentes combinações de parâmetros físicos das cavidades tipo V a serem associadas ao coletor com área igual a 2m² (comprimento do coletor igual a 2m e largura igual a 1m) e altura variável.

A partir de $T_{entrada}$ e $T_{saída}$, o desempenho do coletor associado a cavidades V pode ser obtido com base na mesma metodologia aplicada a coletores solares planos. Este procedimento é apresentado por Duffie e Beckman (1991). Nesta referência é apresentada a curva característica de eficiência instantânea do coletor. Esta curva é fundamental para a avaliação do desempenho do sistema e é obtida a partir de testes em que a radiação total incidente, aproximadamente normal ao plano do coletor. Esta radiação incidente no plano do coletor é avaliada por instrumentos adequados. Adicionalmente na obtenção da curva de desempenho do coletor, deve ser realizado o controle da vazão e das temperaturas de entrada e saída da água no coletor. Condições ambientais também devem ser avaliadas na obtenção desta curva. A partir dos dados mencionados a eficiência térmica (EQ 4.62) é plotada como função do parâmetro $(T_{entrada} - T_{amb})/I_T$. No presente estudo, curvas de eficiência térmica dos coletores compostos por cavidades tipo V foram obtidas de forma a se determinar a configuração mais adequada do sistema. Esta configuração mais adequada refere-se a curvas de eficiência com leve inclinação e valores elevados. As vazões consideradas para a obtenção desta curva foram de 0,02 kg/s.m², recomendada pela ASHRAE Standart 93-77, citado por Zilles (1987) e 0,01kg/s.m². Esta última vazão é utilizada de forma a se comparar os maiores níveis de temperatura atingidos em relação à vazão de 0,02 kg/s.m². Com as curvas de eficiência térmica obtidas foi possível a comparação do coletor proposto com coletores solares de placa plana estudados por Duffie e Beckman (1991). As temperaturas de entrada para obtenção da curva de desempenho térmico assim como os ângulos horários nos quais foram realizadas as simulações do coletor proposto são apresentadas na TAB 5.8.

TABELA 5.8

Temperatura de entrada da água no coletor, $T_{entrada}$, e ângulo horário, ω .

ω (°)	Equinócio de outono	Solstício de inverno	Equinócio de primavera	Solstício de verão
	$T_{entrada}$ (°C)	$T_{entrada}$ (°C)	$T_{entrada}$ (°C)	$T_{entrada}$ (°C)
0	23	18,5	21	22,2
2,5	25	20,5	23	24,2
5	27	22,5	25	26,2
7,5	29	24,5	27	28,2
10	31	26,5	29	30,2
12,5	33	28,5	31	32,2
15	35	30,5	33	34,2
17,5	37	32,5	35	36,2
20	39	34,5	37	38,2
22,5	41	36,5	39	40,2
25	43	38,5	41	42,2
27,5	45	40,5	43	44,2
30	47	42,5	45	46,2
32,5	49	44,5	47	48,2

Para a obtenção da curva de desempenho do coletor proposto, a temperaturas médias ambientes consideradas foram de 23°C para o equinócio de outono, 18,5°C para o solstício de inverno, 21°C para o equinócio de primavera e 22,2°C para o solstício de verão (CEMIG, 1995).

5.5 Implementação do modelo matemático

A modelagem matemática para predição do comportamento térmico de um coletor composto por cavidades tipo V foi desenvolvida no Capítulo 4. Simulações matemáticas do modelo, a partir de sua implementação computacional, permitem avaliar os aspectos geométricos e operacionais do coletor, quando submetido a determinadas condições meteorológicas. Por questões de ordem prática, a análise concentra-se em configurações geométricas próximas às de coletores planos convencionais (comercialmente mais comuns). Os seguintes valores são adotados para as diversas grandezas dimensionais: diâmetro tubular de 15 mm, comprimento de 2m, largura de 1m.

A implementação do algoritmo computacional foi realizada no software EES de acordo com o fluxograma representado na FIG 5.1.

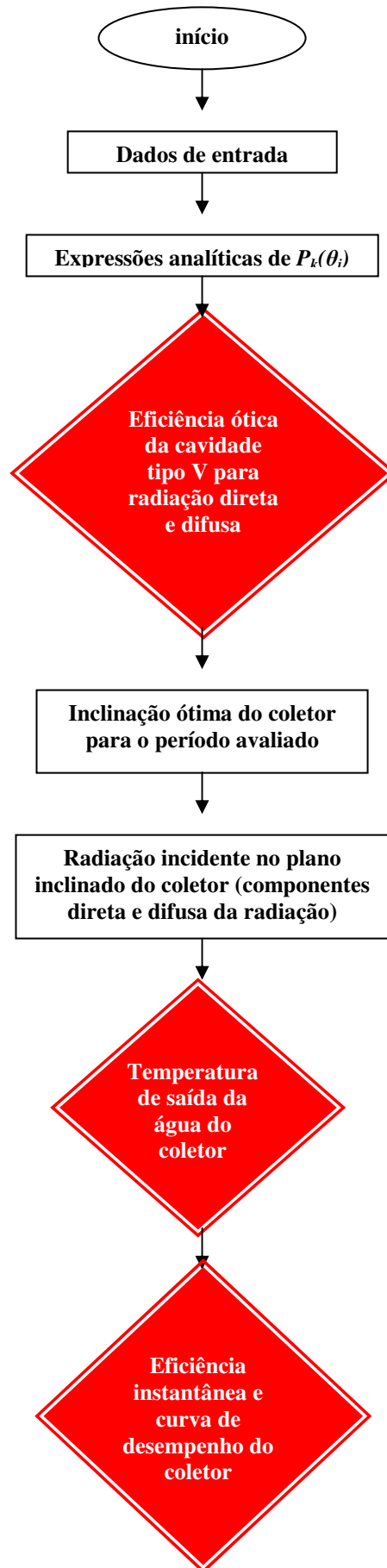


FIGURA 5.1-Etapas de implementação do modelo matemático do coletor composto por cavidades tipo V.

Dentre os dados de entrada, no fluxograma representado na FIG 5.1, destacam-se:

- O semi-ângulo do vértice, ψ ;
- A razão de concentração, C ;
- A área do coletor solar;
- A temperatura ambiente e de entrada da água no coletor;
- A vazão de entrada no coletor do fluido a ser aquecido, \dot{m} ;
- A componente direta e a difusa da radiação, I_b e I_d , na localidade em que deseja analisar, juntamente com a latitude do lugar, ϕ ;
- O dia do ano analisado;
- A emissividade, refletividade e transmissividade dos materiais envolvidos no balanço térmico;
- O ângulo horário, ω .

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Considerações iniciais

Os resultados apresentados são relativos à análise prévia das cavidades tipo V. A razão de concentração de cavidades tipo V com absorvedor cilíndrico é comparada à razão de concentração destas cavidades com absorvedor plano. As eficiências óticas das cavidades tipo V para a radiação direta e difusa também são apresentadas. As cavidades tipo V, cuja eficiência ótica foi avaliada, possuem razões de concentração iguais a 2,0, 2,8, 3,6, 4,0 e 4,4, com semi-ângulos do vértice, ψ , iguais a 25°, 29°, 33°, 37° e 41°. Devido à grande quantidade de resultados gerados, o número de coletores compostos por cavidades V apresentados foi reduzido a cinco. Estes coletores apresentados são representativos no âmbito do trabalho desenvolvido e constituem as configurações mais adequadas do coletor proposto. O parâmetro de seleção destes coletores a serem apresentados baseia-se nas eficiências térmica e ótica de tais configurações, associadas a uma breve análise de custo realizada.

6.2 Propriedades óticas das cavidades V

6.2.1 Análise prévia da configuração da cavidade V

A relação de custo-benefício favorável, apresentada por Fraidenraich (1994), é relativa a semi-ângulos do vértice compreendidos no intervalo entre 25° e 30°. Esta relação envolve os custos relativos às dimensões da superfície refletora. Para valores de $\psi < 25^\circ$ tem-se a redução da área da abertura das cavidades V, e para determinadas razões de concentração ($C < 2,8$) tem-se um número elevado de cavidades e tubos absorvedores, elevando o custo de construção do sistema. Além disto, cavidades com $\psi < 25^\circ$ proporcionam parte significativa de superfícies refletoras abaixo do tubo absorvedor (FIG 6.1), elevando ainda mais o custo do equipamento.

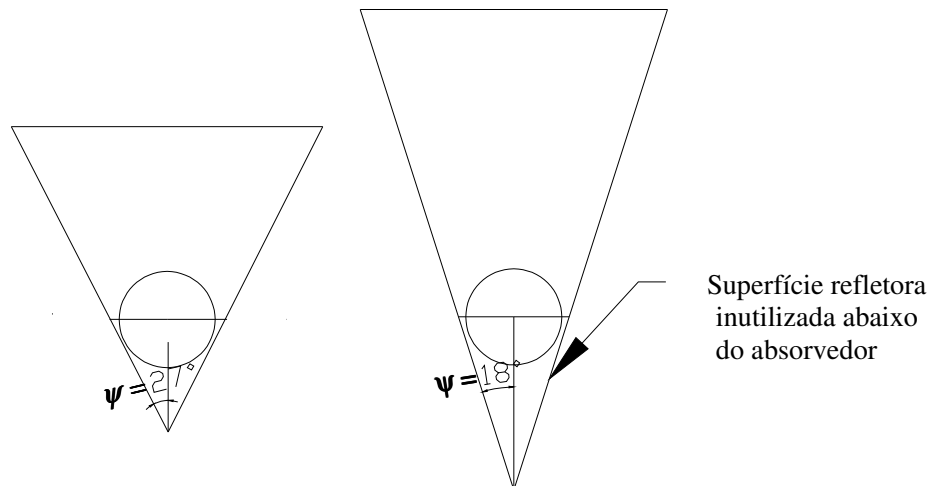


FIGURA 6.1 – Influência de ψ na geometria da cavidade – diâmetro e razão de concentração fixados.

Entretanto, menores áreas da abertura de cavidades V para $\psi < 25^\circ$ podem apresentar relação custo benefício favorável para configurações de coletores compostos por cavidades V, porém, com comprimentos elevados do coletor, além do padrão comercial adotado para coletores planos, que é de cerca de 2m (FIG 6.2).

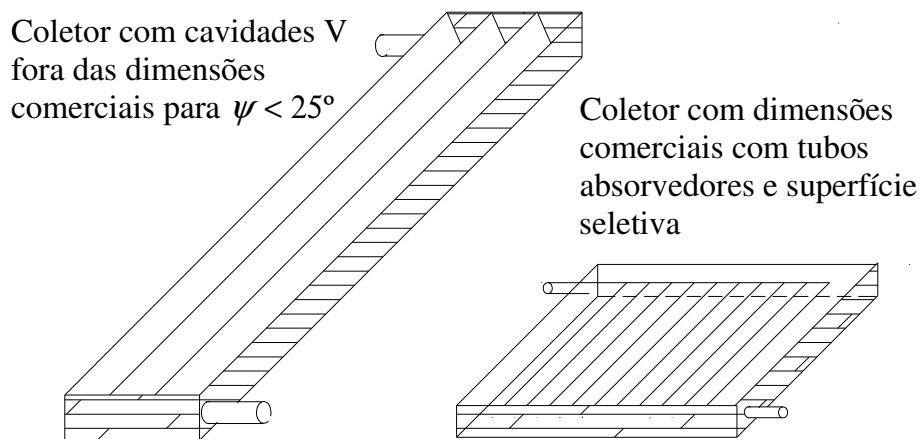


FIGURA 6.2 - Comparação entre coletores utilizando cavidades V que podem apresentar relação custo benefício favorável e coletores comerciais.

6.2.2 Eficiência ótica

Partindo do intervalo mencionado no item 6.1, para semi-ângulos do vértice, foram obtidos valores de eficiência ótica da radiação direta e difusa para razões de concentração iguais a 2,0, 2,8, 3,6, 4,0 e 4,4. Os cálculos consideraram a refletividade do espelho igual a 0,82 (Fraidenraich, 1994). A eficiência ótica da cavidade relativa à radiação direta, $\eta_{otb}(\theta_i)$, calculada para determinados ângulos de incidência da radiação na cavidade, é apresentada nos GRA 6.1 a 6.5, em que ψ é dado em $^\circ$.

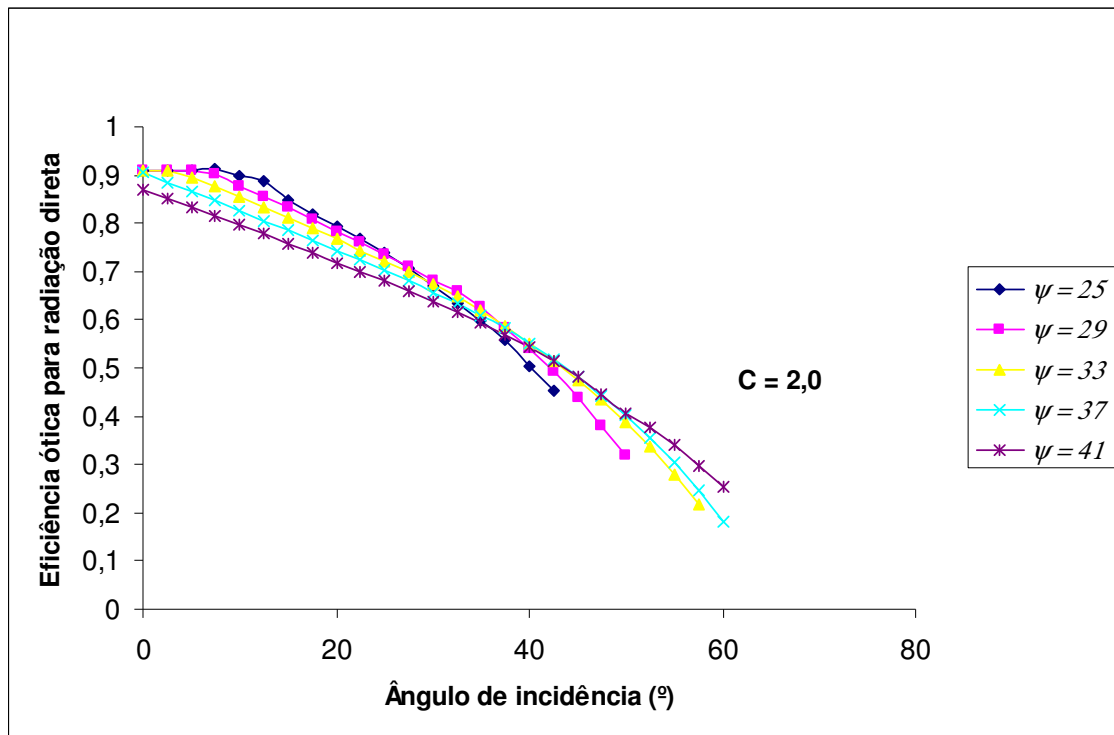


GRÁFICO 6.1 – Eficiência ótica da radiação direta para C = 2,0.

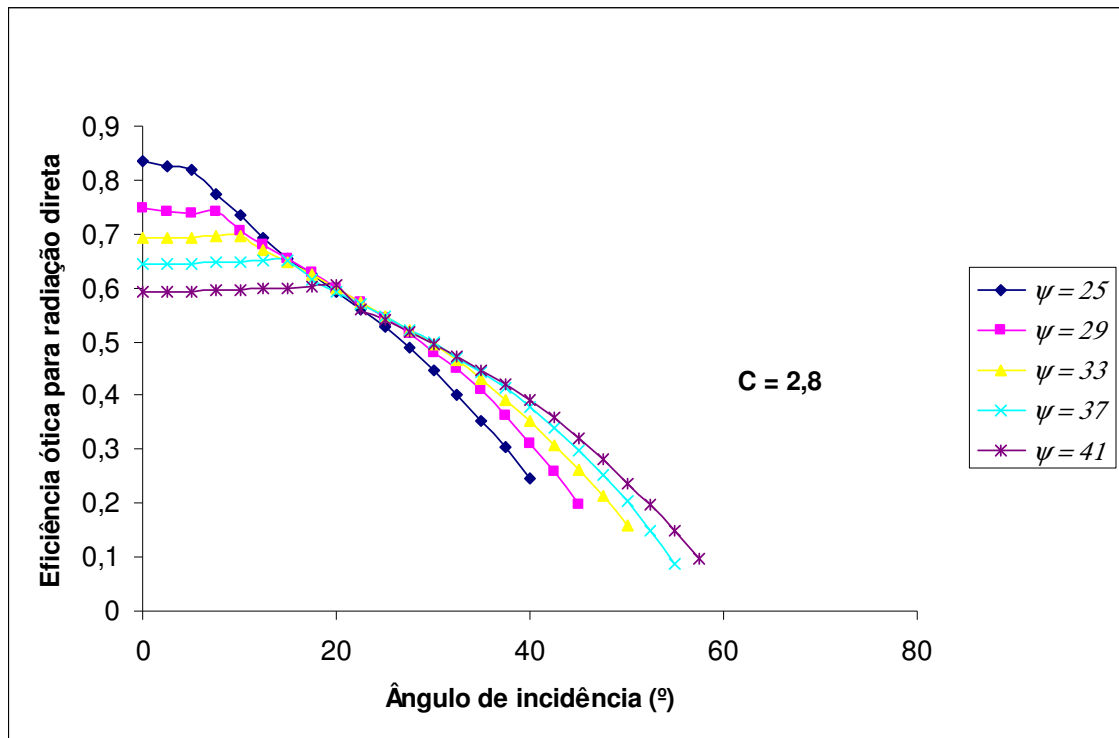


GRÁFICO 6.2 – Eficiência ótica da radiação direta para C = 2,8.

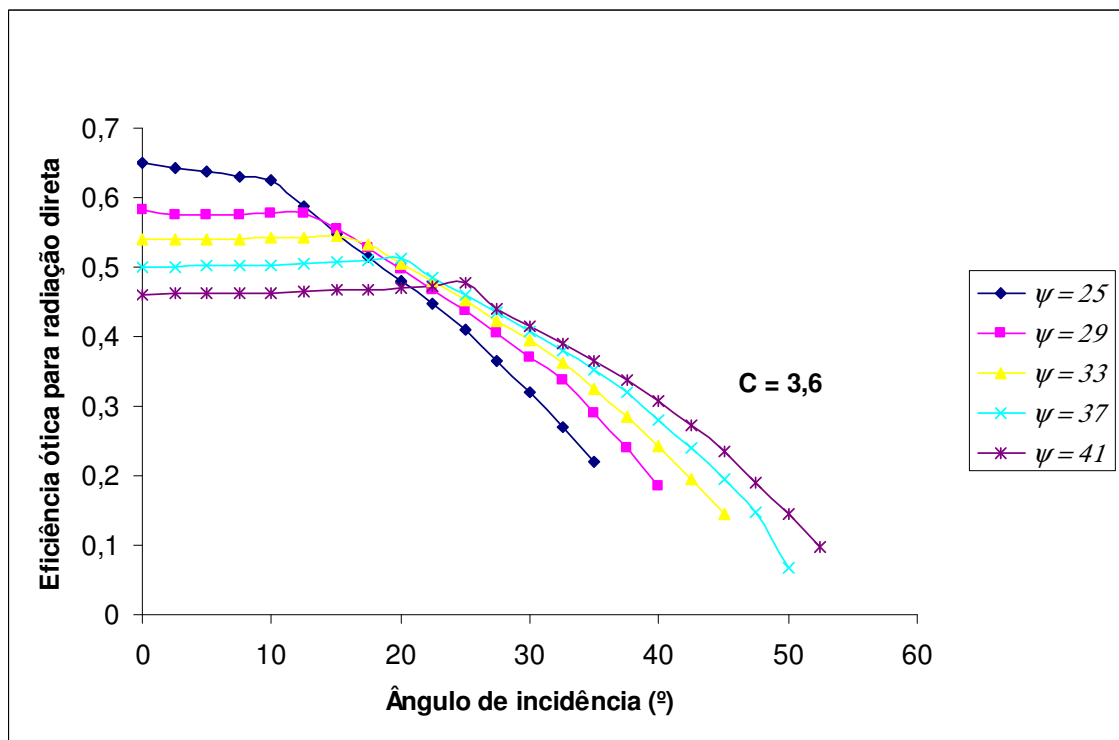
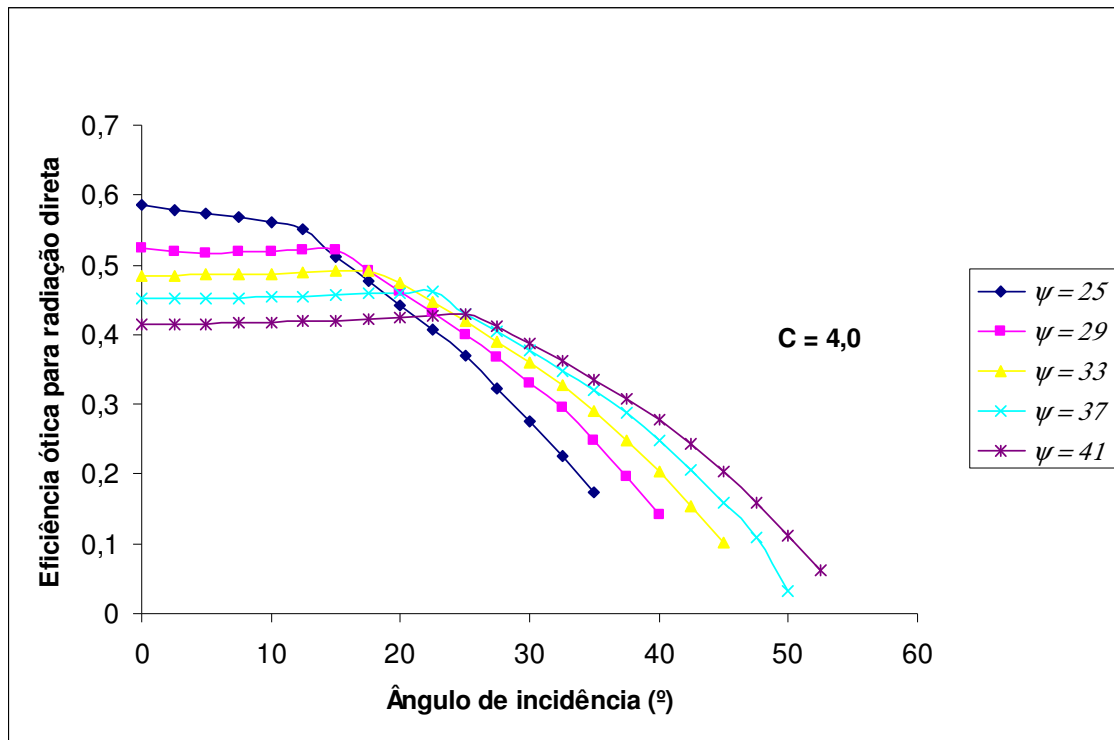
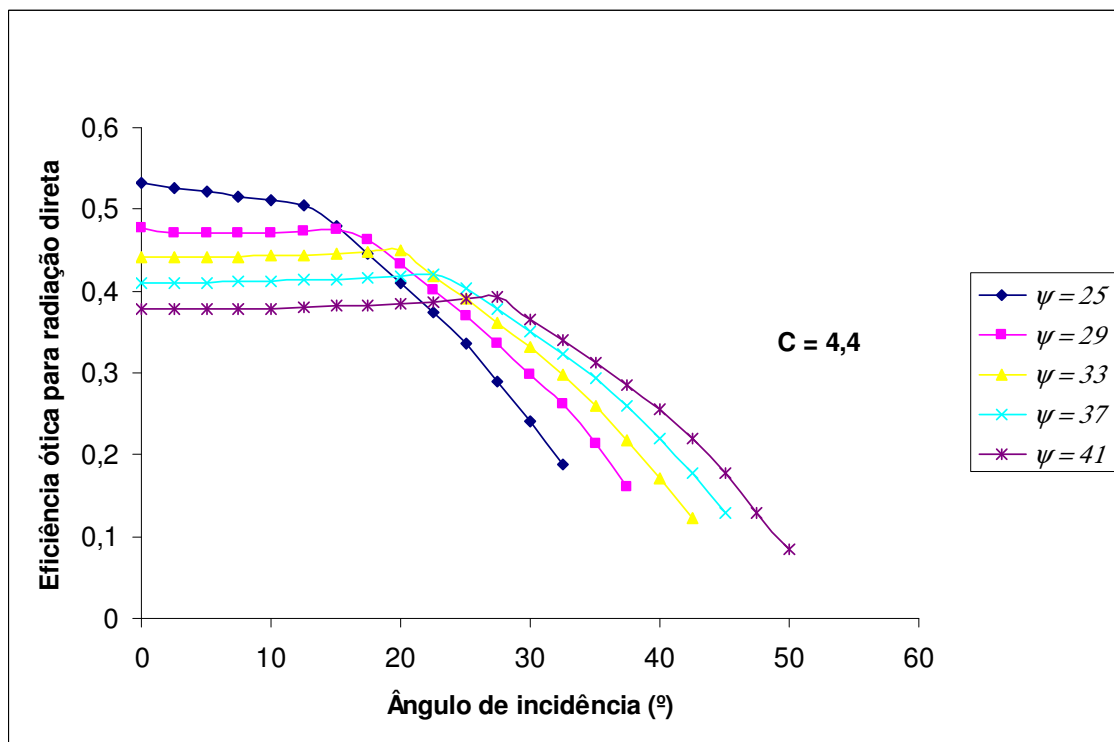


GRÁFICO 6.3 – Eficiência ótica da radiação direta para C = 3,6

GRÁFICO 6.4 – Eficiência ótica da radiação direta para $C = 4,0$ GRÁFICO 6.5 – Eficiência ótica da radiação direta para $C = 4,4$.

Observa-se, de uma forma geral, que, mantendo-se C constante e aumentando-se ψ , a eficiência ótica para a radiação direta inicialmente se reduz com o aumento do ângulo da radiação incidente. Esta redução ocorre até a compensação pela radiação incidente nas

extremidades da abertura que intercepta o absorvedor mediante reflexões e promove um ligeiro aumento na eficiência ótica para a radiação direta para $C > 2,0$ e $\psi > 25$. Tal fato pode ser explicado pela FIG 6.3. Esta parcela de radiação que promove o aumento da eficiência da radiação direta é favorecida para $C > 2$.

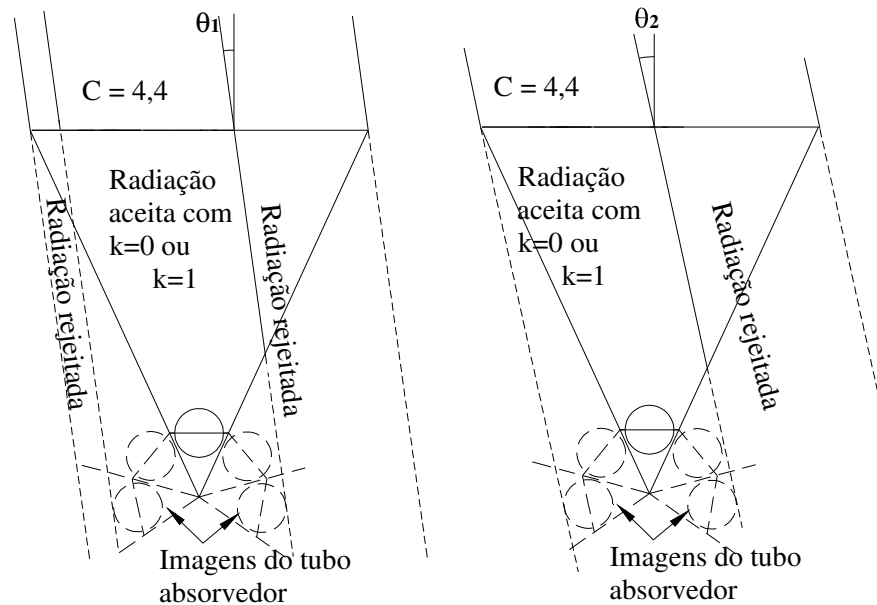


FIGURA 6.3 – Radiação que é rejeitada e que intercepta o absorvedor pela extremidade da abertura para ângulos de incidência crescentes.

Na FIG 6.3, $\theta_1 < \theta_2$, e como a eficiência ótica para a radiação direta também depende do número de reflexões e da refletividade do espelho, observa-se que esta eficiência é superior para o ângulo de incidência da radiação igual a θ_2 , que realiza no máximo uma reflexão. Para a radiação incidente com ângulo θ_1 , além da radiação rejeitada na extremidade esquerda da cavidade V tem-se um fração desta radiação realizando duas reflexões até interceptar o absorvedor.

Para $C = 3,6, 4,0$ e $4,4$ (GRA 6.3 a 6.5), quanto maior o semi-ângulo do vértice, maior é a aceitação da radiação solar ao longo do dia. Isto se deve às características dos concentradores estacionários que passam a rejeitar radiação com o aumento do ângulo da radiação incidente na abertura.

Aumentando-se ψ e mantendo-se C constante, a abertura da cavidade se aproxima do tubo absorvedor, o que faz com que ocorram perdas de parte da radiação para modos de reflexão $k > 0$, anteriormente aceita para valores menores de ψ . Entretanto, devido ao caminho mais curto da radiação até o absorvedor, alguns modos de reflexão tornam-se mais efetivos, porém podem não compensar a perda de parte de modos $k > 0$ para a radiação com ângulo de incidência próximos de zero.

O maior valor para a eficiência ótica relativa à radiação direta foi observado no GRA 6.1, $\eta_{otb}(0) = 0,92$ para $\psi = 25^\circ$ e $C = 2,0$. Este resultado se deve a características similares ao truncamento apresentado por Mannan e Bannerot (1978) e Fraidenraich (1998). No presente estudo, maiores valores de eficiência ótica da radiação direta são alcançados para razões de concentração em que toda a radiação incidente sobre a abertura intercepta o tubo absorvedor (FIG 6.4).

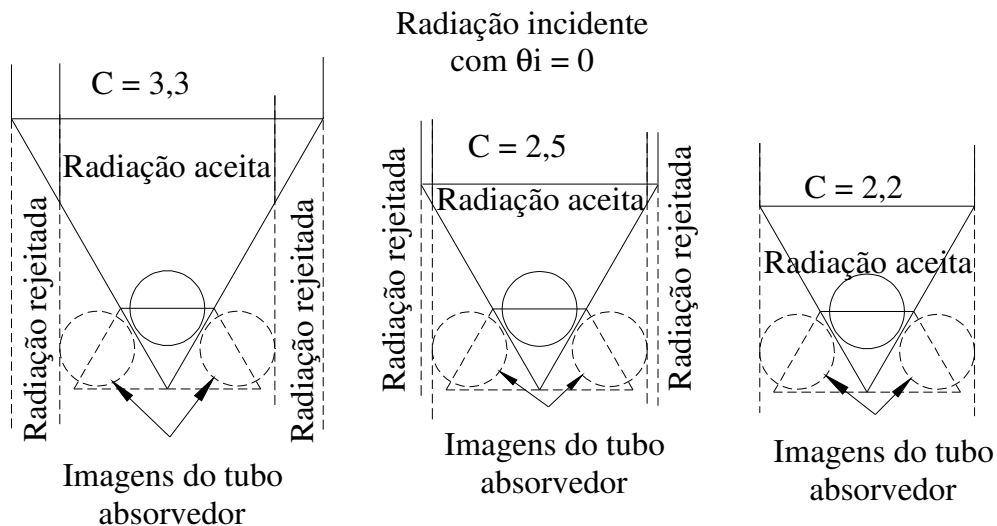


FIGURA 6.4 – Comportamento da radiação aceita e rejeitada com variação da razão de concentração ($\psi = 30^\circ$ e o raio = 7,5 mm).

A eficiência ótica para a componente difusa da radiação solar incidente no plano do coletor tem o comportamento idêntico à eficiência ótica para a radiação aceita. Este fato pode ser observado pela EQ 4.38 considerando o intervalo de obtenção desta eficiência ótica relativa a radiação difusa que é de 0° a 90° .

6.3. Análise térmica do coletor composto por cavidades V

6.3.1 Curva de desempenho térmico

Com base na metodologia definida no item 5.4, foram obtidas as curvas de desempenho dos coletores propostos, apresentadas nos GRA 6.6 a 6.10. O número de cavidades mencionado em cada gráfico reflete a quantidade de tubos por metro de largura do coletor. A vazão de água total através do coletor foi de $0,04 \text{ kg/s/m}^2$ de área de abertura total, valor recomendado pela ASHRAE Standart 93-77, citado por Zilles (1987). Os ensaios consideraram perfis de radiação solar correspondentes aos equinócios e aos solstícios,

conforme descrito no capítulo anterior. As temperaturas de entrada são apresentadas na TAB 5.8, e as simulações foram efetuadas em períodos horários correspondentes a uma faixa dos ângulos de incidência da radiação direta de 0° a $32,5^\circ$. Este intervalo é o máximo avaliado, porque existem coletores em que a eficiência térmica praticamente se extingue antes de $\omega = 32,5^\circ$. As temperaturas ambientes, mantidas constantes durante as simulações (Leão, 1989; Duffie e Beckman, 1991), foram iguais a 23°C para o equinócio de outono, $18,5^\circ\text{C}$ para o solstício de inverno, 21°C para o equinócio de primavera e $22,2^\circ\text{C}$ para o solstício de verão (CEMIG, 1995).

Os GRA 6.6 a 6.10 apresentam o desempenho térmico do coletor, especificamente da eficiência térmica instantânea em função do parâmetro $(T_{\text{entrada}} - T_{\text{amb}})/I_T$, que é uma representação sistemática ou padronizada para coletores solares planos (Duffie e Beckman, 1991).

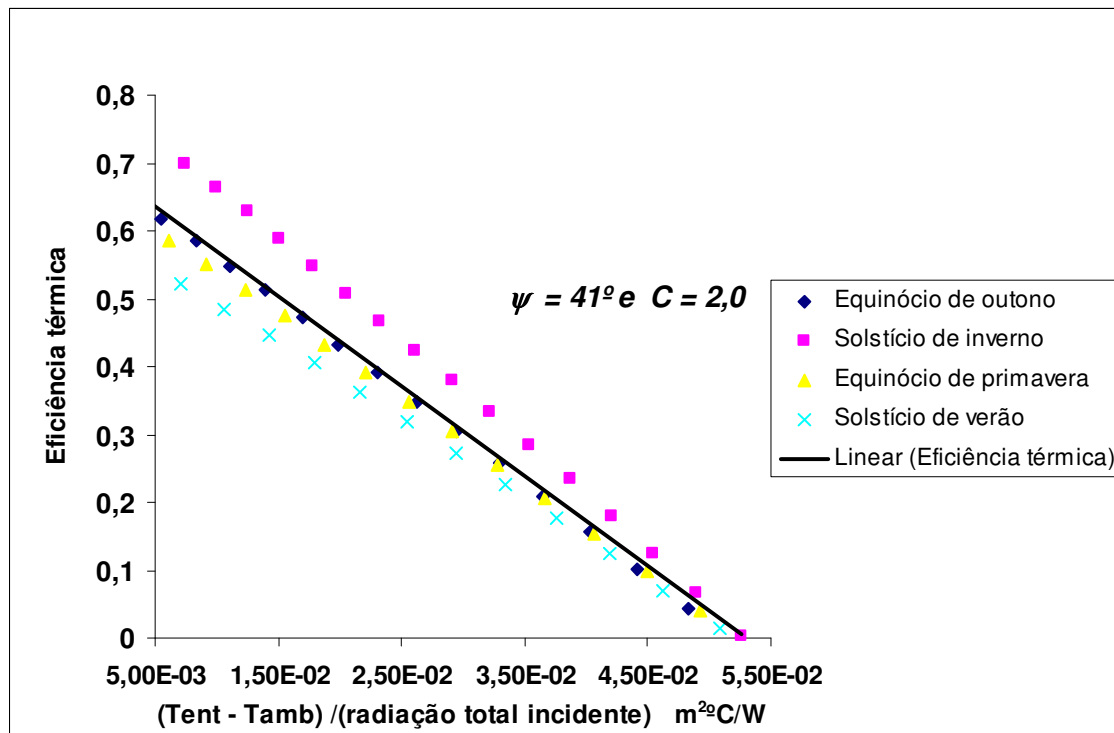


GRÁFICO 6.6 – Curva de desempenho do coletor constituído de 21 cavidades tipo V, altura igual a 2,8 cm e largura dos refletores igual 3,5 cm.

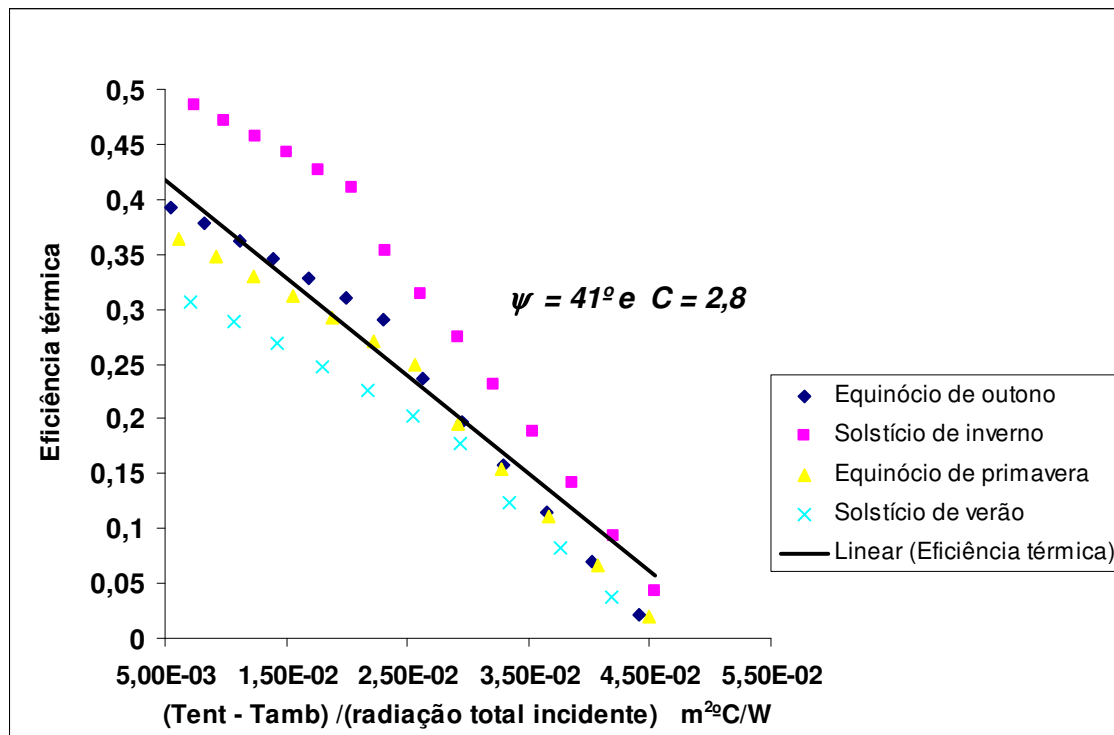


GRÁFICO 6.7 – Curva de desempenho do coletor constituído de 15 cavidades tipo V, altura igual a 3,8 cm e largura dos refletores igual 5,0 cm.

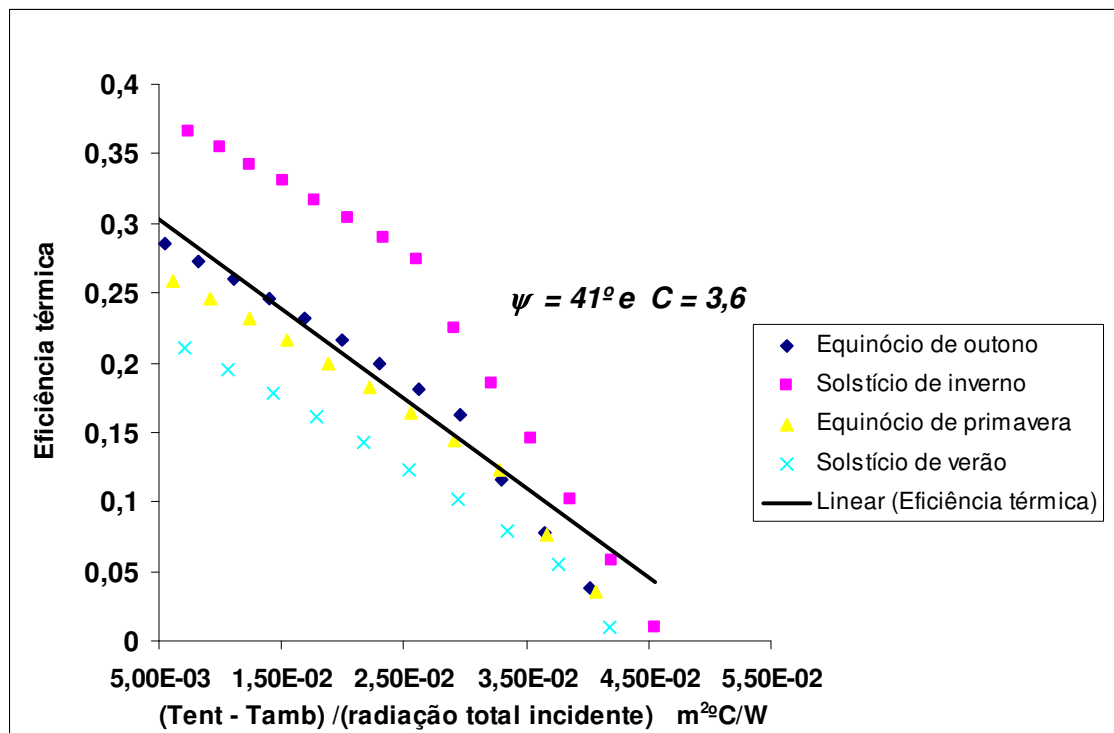


GRÁFICO 6.8 – Curva de desempenho do coletor constituído de 12 cavidades tipo V, altura igual a 4,7 cm e largura dos refletores igual 6,2 cm.

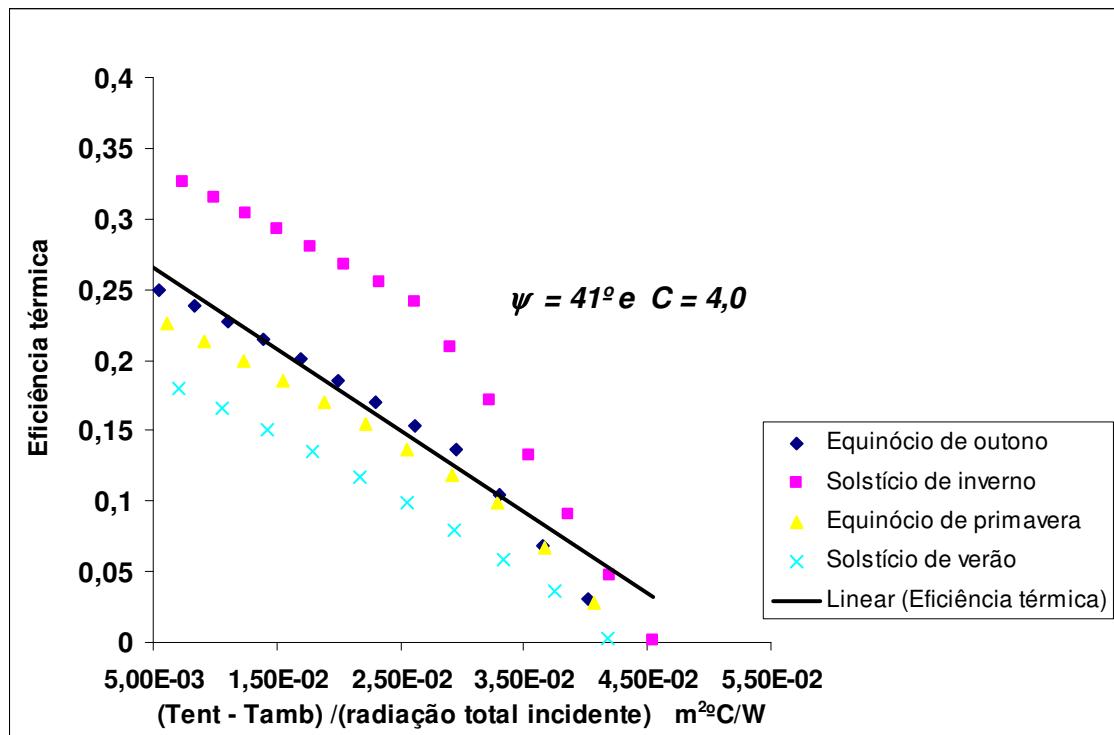


GRÁFICO 6.9 – Curva de desempenho do coletor constituído de 11 cavidades tipo V, altura igual a 5,2 cm e largura dos refletores igual 6,9 cm.

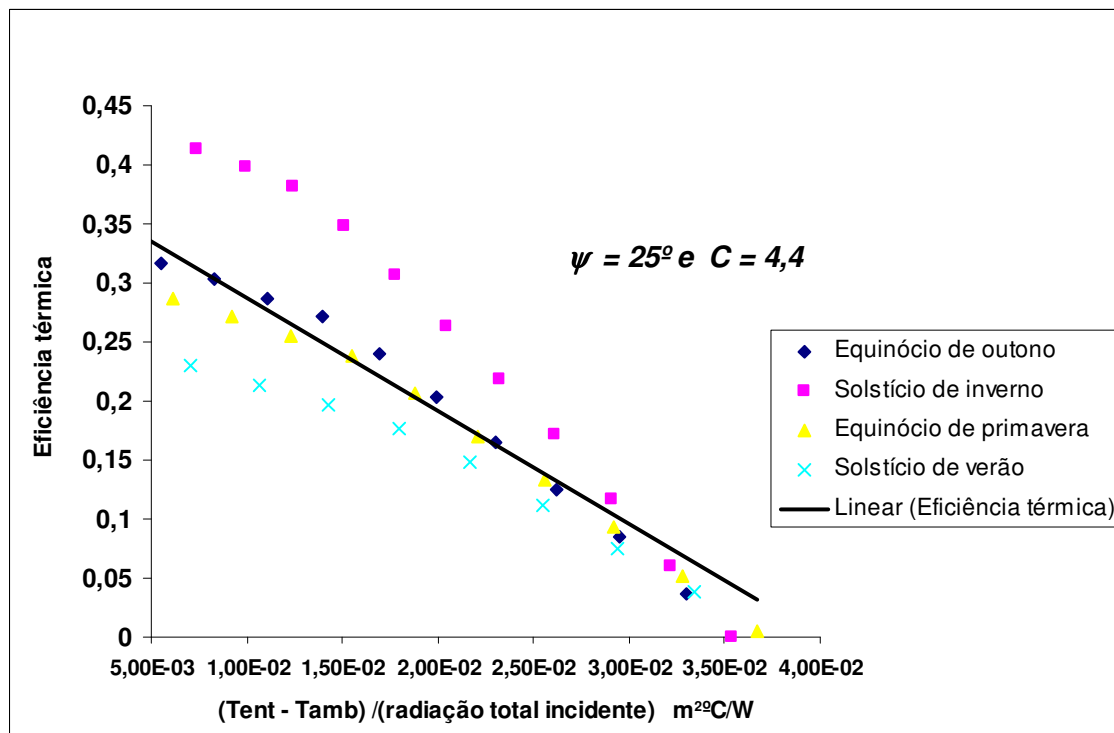


GRÁFICO 6.10 – Curva de desempenho do coletor constituído de 10 cavidades tipo V, altura igual a 11,0 cm e largura dos refletores igual 12,3 cm

Nos GRA 6.6 a 6.10 observa-se que coletores de elevadas eficiências possuem cavidade V com menores razões de concentração. Entretanto, essas configurações envolvem um elevado número de cavidades V e tubos absorvedores. No caso da configuração do GRA

6.6 ($C = 2,0$), resultam 21 cavidades/tubos absorvedores por metro de largura de coletor, valor bastante alto em comparação com os coletores solares planos comerciais que têm de 9 a 10 tubos por metro.

Para radiação com incidência aproximadamente normal ao plano do coletor, a configuração referente ao GRA 6.6 apresenta uma eficiência térmica ligeiramente superior à de coletores solares planos com uma cobertura de vidro (para aquecimento de água), estudados por Duffie e Beckman (1991). Para ângulos de incidência maiores, o desempenho térmico do concentrador é bastante próximo dos planos. Com o aumento da razão de concentração (e redução de ψ), resultam coletores (GRA 6.9 e 6.10) com desempenho térmico inferior ao de coletores planos.

6.3.2 Temperatura de saída da água

Valores de temperaturas de entrada e saída da água utilizados na obtenção das curvas de eficiência térmica mostradas nos GRA 6.6 a 6.10 são apresentados nas tabelas 6.1 a 6.10. As simulações consideraram a vazão total de água de $0,02 \text{ kg/s/m}^2$ (como no caso da eficiência térmica) e um novo valor de $0,01 \text{ kg/s/m}^2$. Esta nova vazão mássica proposta é útil à verificação do aumento da temperatura em relação aos resultados obtidos a partir da vazão de $0,02 \text{ kg/s/m}^2$.

TABELA 6.1

Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=2,0$, $\psi=41^\circ$, $\dot{m}=0,04$ kg/s, coletor constituído de 21 cavidades).

Hora solar	Equinócio de outono		Solstício de inverno		Equinócio de Primavera		Solstício de verão	
	T_{entrada} ($^\circ\text{C}$)	$T_{\text{saída}}$ ($^\circ\text{C}$)	T_{entrada} ($^\circ\text{C}$)	$T_{\text{saída}}$ ($^\circ\text{C}$)	T_{entrada} ($^\circ\text{C}$)	$T_{\text{saída}}$ ($^\circ\text{C}$)	T_{entrada} ($^\circ\text{C}$)	$T_{\text{saída}}$ ($^\circ\text{C}$)
12:00	23	28,96	18,5	26,31	21	26,12	22,2	26,22
12:10	25	30,67	20,5	27,98	23	27,86	24,2	27,98
12:20	27	32,37	22,5	29,63	25	29,57	26,2	29,73
12:30	29	34,05	24,5	31,28	27	31,28	28,2	31,47
12:40	31	35,73	26,5	32,91	29	32,98	30,2	33,2
12:50	33	37,39	28,5	34,53	31	34,66	32,2	34,92
13:00	35	39,01	30,5	36,09	33	36,31	34,2	36,6
13:10	37	40,63	32,5	37,68	35	37,96	36,2	38,3
13:20	39	42,25	34,5	39,25	37	39,6	38,2	39,98
13:30	41	43,86	36,5	40,82	39	41,24	40,2	41,66
13:40	43	45,46	38,5	42,38	41	42,86	42,2	43,32
13:50	45	47,05	40,5	43,92	43	44,48	44,2	44,98
14:00	47	48,63	42,5	45,46	45	46,09	46,2	46,63
14:10	49	50,2	44,5	47	47	47,69	48,2	48,28
14:20	51	51,77	46,5	48,52	49	49,28	-	-
14:30	53	53,33	48,5	50,04	-	-	-	-
14:40	-	-	50,5	51,56	-	-	-	-
14:50	-	-	52,5	53,05	-	-	-	-
15:00	-	-	54,5	54,52	-	-	-	-

TABELA 6.2

Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=2,0$, $\psi=41^\circ$, $\dot{m} = 0,02$ kg/s, coletor constituído de 21 cavidades).

Hora solar	Equinócio de outono		Solstício de inverno		Equinócio de Primavera		Solstício de verão	
	T_{entrada} ($^\circ\text{C}$)	$T_{\text{saída}}$ ($^\circ\text{C}$)	T_{entrada} ($^\circ\text{C}$)	$T_{\text{saída}}$ ($^\circ\text{C}$)	T_{entrada} ($^\circ\text{C}$)	$T_{\text{saída}}$ ($^\circ\text{C}$)	T_{entrada} ($^\circ\text{C}$)	$T_{\text{saída}}$ ($^\circ\text{C}$)
12:00	23	34,48	18,5	33,52	21	30,87	22,2	23
12:10	25	35,9	20,5	34,86	23	32,34	24,2	25
12:20	27	37,31	22,5	36,18	25	33,79	26,2	27
12:30	29	38,69	24,5	37,47	27	35,21	28,2	29
12:40	31	40,05	26,5	38,75	29	36,62	30,2	31
12:50	33	41,39	28,5	40,01	31	38	32,2	33
13:00	35	42,65	30,5	41,17	33	39,32	34,2	35
13:10	37	43,93	32,5	42,37	35	40,65	36,2	37
13:20	39	45,2	34,5	43,55	37	41,96	38,2	39
13:30	41	46,44	36,5	44,72	39	43,26	40,2	41
13:40	43	47,67	38,5	45,86	41	44,54	42,2	43
13:50	45	48,89	40,5	47	43	45,81	44,2	45
14:00	47	50,09	42,5	48,12	45	47,06	46,2	47
14:10	49	51,28	44,5	49,23	47	48,3	48,2	49
14:20	51	52,46	46,5	50,33	49	49,53	50,2	51
14:30	53	53,63	48,5	51,42	-	-	-	-
14:40	-	-	50,5	52,5	-	-	-	-
14:50	-	-	52,5	53,53	-	-	-	-
15:00	-	-	54,5	54,53	-	-	-	-

Os resultados apresentados nas TAB 6.1 e 6.2 estão estreitamente associados à eficiência ótica do coletor e são essenciais à obtenção da curva de desempenho térmico destes equipamentos. Os resultados apresentados na TAB 6.1 e 6.2 referem-se ao coletor composto por cavidades V com $C = 2,0$ e $\psi = 41^\circ$.

Os resultados que correspondem às configurações apresentadas nos GRA 6.7 a 6.10, constam das TAB 6.3 a 6.10.

TABELA 6.3

Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=2,8$, $\psi=41^\circ$, $\dot{m}=0,04$ kg/s, coletor constituído de 15 cavidades).

Hora solar	Equinócio de outono		Solstício de inverno		Equinócio de Primavera		Solstício de verão	
	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)
12:00	23	26,66	18,5	23,6	21	24,08	22,2	24,51
12:10	25	28,55	20,5	25,48	23	25,97	24,2	26,4
12:20	27	30,42	22,5	27,35	25	27,84	26,2	28,27
12:30	29	32,27	24,5	29,2	27	29,7	28,2	30,14
12:40	31	34,12	26,5	31,05	29	31,55	30,2	32
12:50	33	35,96	28,5	32,89	31	33,39	32,2	33,85
13:00	35	37,79	30,5	34,71	33	35,23	34,2	35,69
13:10	37	39,6	32,5	36,53	35	37,05	36,2	37,53
13:20	39	41,41	34,5	38,34	37	38,86	38,2	39,35
13:30	41	42,94	36,5	39,77	39	40,44	40,2	40,99
13:40	43	44,6	38,5	41,37	41	42,12	42,2	42,72
13:50	45	46,25	40,5	42,97	43	43,8	44,2	44,44
14:00	47	47,9	42,5	44,56	45	45,47	-	-
14:10	49	49,54	44,5	46,15	47	47,14	-	-
14:20	51	51,17	46,5	47,73	-	-	-	-
14:30	-	-	48,5	49,3	-	-	-	-
14:40	-	-	50,5	50,86	-	-	-	-

TABELA 6.4

Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=2,8$, $\psi=41^\circ$, $\dot{m}=0,02$ kg/s, coletor constituído de 15 cavidades).

Hora solar	Equinócio de outono		Solstício de inverno		Equinócio de Primavera		Solstício de verão	
	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)
12:00	23	30,12	18,5	28,41	21	27	22,2	26,69
12:10	25	31,88	20,5	30,16	23	28,76	24,2	28,47
12:20	27	33,62	22,5	31,88	25	30,51	26,2	30,22
12:30	29	35,33	24,5	33,59	27	32,23	28,2	31,96
12:40	31	37,03	26,5	35,28	29	33,94	30,2	33,68
12:50	33	38,71	28,5	36,95	31	35,62	32,2	35,39
13:00	35	40,37	30,5	38,61	33	37,29	34,2	37,08
13:10	37	42,01	32,5	40,25	35	38,94	36,2	38,75
13:20	39	43,64	34,5	41,88	37	40,58	38,2	40,41
13:30	41	44,73	36,5	42,77	39	41,76	40,2	41,73
13:40	43	46,07	38,5	44,01	41	43,16	42,2	43,2
13:50	45	47,4	40,5	45,24	43	44,53	44,2	44,66
14:00	47	48,72	42,5	46,45	45	45,9	-	-
14:10	49	50,02	44,5	47,65	47	47,26	-	-
14:20	51	51,32	46,5	48,85	-	-	-	-
14:30	-	-	48,5	50,02	-	-	-	-
14:40	-	-	50,5	51,19	-	-	-	-

TABELA 6.5

Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=3,6$, $\psi=41^\circ$, $\dot{m}=0,04$ kg/s, coletor constituído de 12 cavidades).

Hora solar	Equinócio de outono		Solstício de inverno		Equinócio de Primavera		Solstício de verão	
	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)
12:00	23	25,68	18,5	22,37	21	23,22	22,2	23,81
12:10	25	27,58	20,5	24,28	23	25,13	24,2	25,72
12:20	27	29,48	22,5	26,17	25	27,03	26,2	27,62
12:30	29	31,36	24,5	28,05	27	28,91	28,2	29,51
12:40	31	33,24	26,5	29,92	29	30,79	30,2	31,4
12:50	33	35,1	28,5	31,79	31	32,66	32,2	33,27
13:00	35	36,96	30,5	33,65	33	34,52	34,2	35,14
13:10	37	38,81	32,5	35,5	35	36,38	36,2	37
13:20	39	40,65	34,5	37,34	37	38,22	38,2	38,86
13:30	41	42,49	36,5	39,18	39	40,06	40,2	40,71
13:40	43	44,32	38,5	41,01	41	41,89	42,2	42,55
13:50	45	45,93	40,5	42,53	43	43,54	44,2	44,26
14:00	47	47,61	42,5	44,15	45	45,25	-	-
14:10	49	49,29	44,5	45,77	-	-	-	-
14:20	-	-	46,5	47,39	-	-	-	-
14:30	-	-	48,5	48,99	-	-	-	-
14:40	-	-	50,5	50,59	-	-	-	-

TABELA 6.6

Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=3,6$, $\psi=41^\circ$, $\dot{m}=0,02$ kg/s, coletor constituído de 12 cavidades).

Hora solar	Equinócio de outono		Solstício de inverno		Equinócio de Primavera		Solstício de verão	
	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)
12:00	23	28,24	18,5	26,07	21	25,35	22,2	25,35
12:10	25	30,04	20,5	27,86	23	27,16	24,2	27,17
12:20	27	31,83	22,5	29,64	25	28,95	26,2	28,97
12:30	29	33,6	24,5	31,4	27	30,73	28,2	30,76
12:40	31	35,35	26,5	33,15	29	32,48	30,2	32,53
12:50	33	37,08	28,5	34,88	31	34,23	32,2	34,28
13:00	35	38,8	30,5	36,6	33	35,95	34,2	36,03
13:10	37	40,51	32,5	38,3	35	37,66	36,2	37,76
13:20	39	42,2	34,5	39,99	37	39,36	38,2	39,48
13:30	41	43,88	36,5	41,67	39	41,05	40,2	41,18
13:40	43	45,54	38,5	43,34	41	42,72	42,2	42,88
13:50	45	46,79	40,5	44,41	43	44,05	44,2	44,31
14:00	47	48,18	42,5	45,69	45	45,49	-	-
14:10	49	49,56	44,5	46,95	-	-	-	-
14:20	-	-	46,5	48,2	-	-	-	-
14:30	-	-	48,5	49,44	-	-	-	-
14:40	-	-	50,5	50,67	-	-	-	-

TABELA 6.7

Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=4,0$, $\psi=41^\circ$, $\dot{m}=0,04$ kg/s, coletor constituído de 11 cavidades).

Hora solar	Equinócio de outono		Solstício de inverno		Equinócio de Primavera		Solstício de verão	
	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)
12:00	23	25,36	18,5	21,96	21	22,94	22,2	23,59
12:10	25	27,27	20,5	23,87	23	24,86	24,2	25,51
12:20	27	29,17	22,5	25,77	25	26,77	26,2	27,42
12:30	29	31,07	24,5	27,66	27	28,66	28,2	29,32
12:40	31	32,95	26,5	29,54	29	30,55	30,2	31,21
12:50	33	34,83	28,5	31,42	31	32,43	32,2	33,1
13:00	35	36,7	30,5	33,29	33	34,3	34,2	34,98
13:10	37	38,56	32,5	35,15	35	36,17	36,2	36,85
13:20	39	40,42	34,5	37,01	37	38,03	38,2	38,72
13:30	41	42,26	36,5	38,86	39	39,88	40,2	40,58
13:40	43	44,11	38,5	40,7	41	41,72	42,2	42,43
13:50	45	45,84	40,5	42,39	43	43,48	44,2	44,22
14:00	47	47,54	42,5	44,03	45	45,2	-	-
14:10	49	49,23	44,5	45,66	-	-	-	-
14:20	-	-	46,5	47,29	-	-	-	-
14:30	-	-	48,5	48,9	-	-	-	-
14:40	-	-	50,5	50,52	-	-	-	-

TABELA 6.8

Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=4,0$, $\psi=41^\circ$, $\dot{m}=0,02$ kg/s, coletor constituído de 11 cavidades).

Hora solar	Equinócio de outono		Solstício de inverno		Equinócio de Primavera		Solstício de verão	
	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)
12:00	23	27,61	18,5	25,27	21	24,81	22,2	24,93
12:10	25	29,44	20,5	27,08	23	26,64	24,2	26,76
12:20	27	31,24	22,5	28,88	25	28,45	26,2	28,58
12:30	29	33,03	24,5	30,66	27	30,24	28,2	30,38
12:40	31	34,8	26,5	32,43	29	32,02	30,2	32,17
12:50	33	36,56	28,5	34,18	31	33,78	32,2	33,95
13:00	35	38,3	30,5	35,92	33	35,53	34,2	35,71
13:10	37	40,03	32,5	37,64	35	37,27	36,2	37,46
13:20	39	41,75	34,5	39,36	37	38,99	38,2	39,2
13:30	41	43,45	36,5	41,06	39	40,7	40,2	40,93
13:40	43	45,14	38,5	42,76	41	42,4	42,2	42,65
13:50	45	46,62	40,5	44,15	43	43,92	44,2	44,24
14:00	47	48,04	42,5	45,45	45	45,39	-	-
14:10	49	49,45	44,5	46,74	-	-	-	-
14:20	-	-	46,5	48,02	-	-	-	-
14:30	-	-	48,5	49,28	-	-	-	-
14:40	-	-	50,5	50,53	-	-	-	-

TABELA 6.9

Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=4,4$, $\psi=25^\circ$, $\dot{m}=0,04$ kg/s, coletor constituído de 10 cavidades).

Hora solar	Equinócio de outono		Solstício de inverno		Equinócio de Primavera		Solstício de verão	
	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)
12:00	23	26	18,5	22,94	21	23,47	22,2	23,96
12:10	25	27,88	20,5	24,8	23	25,36	24,2	25,86
12:20	27	29,76	22,5	26,66	25	27,24	26,2	27,75
12:30	29	31,62	24,5	28,5	27	29,12	28,2	29,64
12:40	31	33,47	26,5	30,34	29	30,98	30,2	31,51
12:50	33	35,32	28,5	32,17	31	32,83	32,2	33,38
13:00	35	37,04	30,5	33,81	33	34,58	34,2	35,18
13:10	37	38,71	32,5	35,39	35	36,29	36,2	36,94
13:20	39	40,37	34,5	36,96	37	37,99	38,2	38,69
13:30	41	42,03	36,5	38,52	39	39,69	40,2	40,44
13:40	43	43,68	38,5	40,07	41	41,38	-	-
13:50	45	45,29	40,5	41,56	43	43,03	-	-
14:00	-	-	42,5	43,03	-	-	-	-
14:20	-	-	44,5	44,5	-	-	-	-

TABELA 6.10

Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=4,4$, $\psi=25^\circ$, $\dot{m}=0,02$ kg/s, coletor constituído de 10 cavidades).

Hora solar	Equinócio de outono		Solstício de inverno		Equinócio de Primavera		Solstício de verão	
	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)
12:00	23	28,88	18,5	27,2	21	25,85	22,2	25,65
12:10	25	30,65	20,5	28,92	23	27,63	24,2	27,45
12:20	27	32,39	22,5	30,62	25	29,39	26,2	29,24
12:30	29	34,12	24,5	32,31	27	31,13	28,2	31,01
12:40	31	35,82	26,5	33,98	29	32,86	30,2	32,77
12:50	33	37,52	28,5	35,64	31	34,57	32,2	34,51
13:00	35	38,97	30,5	36,95	33	36,08	34,2	36,1
13:10	37	40,33	32,5	38,12	35	37,51	36,2	37,64
13:20	39	41,67	34,5	39,27	37	38,93	38,2	39,16
13:30	41	43	36,5	40,42	39	40,33	40,2	40,67
13:40	43	44,33	38,5	41,55	41	41,73	-	-
13:50	45	45,56	40,5	42,55	43	43,06	-	-
14:00	-	-	42,5	43,53	-	-	-	-
14:20	-	-	44,5	44,5	-	-	-	-

Nas TAB 6.1 a 6.10, a coleta de radiação pelos coletores ao longo do dia diminuiu com o aumento da razão de concentração e com a redução do semi-ângulo do vértice das cavidades V, como já era esperado pelos GRA 6.1 a 6.5. Além disto, são observados níveis de temperatura mais elevados para uma determinada configuração do coletor proposto ($C = 2,0$ e

$\psi = 41^\circ$). A ausência de dados nas TAB 6.1 a 6.10 relativa aos solstício de verão, equinócios de primavera e outono refere-se à pequena contribuição da radiação direta nestes períodos e com o esgotamento da eficiência térmica do coletor composto por cavidades V. Esta pouca contribuição da radiação direta em relação à componente difusa no equinócio de primavera e no solstício de verão pode ser observada na TAB 5.6.

As temperaturas de saída da água ao longo do dia para equinócios e solstícios apresentadas no TAB 6.1 são superadas às 15 horas após o meio dia solar. Após este período o coletor proposto ($C = 2,0$ e $\psi = 41^\circ$) possui eficiência ótica e térmica iguais a zero. Este coletor aproveita a radiação solar a maior parte do dia em relação aos demais coletores compostos por cavidades tipo V estudados. De um modo geral, os coletores investigados colecionam a radiação solar até as 14:40 horas em relação ao meio dia solar. Esta característica sinaliza a desvantagem do coletor proposto em relação ao coletor plano do tipo placa e tubos que por sua vez aproveita a radiação solar praticamente o dia inteiro.

As duas vazões (0,04 kg/s e 0,02 kg/s) consideradas na simulação computacional do coletor solar composto por cavidades tipo V influenciam na temperatura de saída da água deste coletor. Para a menor vazão considerada (0,02 kg/s) maior a temperatura de saída da água em relação ao escoamento deste fluido com a maior vazão (0,04 kg/s). Esta maior temperatura de saída da água do coletor estudado para a vazão de 0,02 kg/s proporciona o aumento das perdas térmicas em relação à simulação do coletor estudado com a vazão igual a 0,04 kg/s.

6.3.3 Desempenho térmico dos coletores com $C=2,0$ e $\psi=41^\circ$ e com $C=4,4$ e $\psi=25^\circ$

A configuração caracterizada por $C = 2,0$ e $\psi = 41^\circ$ constitui, apesar do custo e do elevado número de tubos, a única opção entre os coletores estudados neste trabalho que opera em condições próximas a coletores planos comerciais. Por esta razão, para a configuração proposta ($C = 2,0$ e $\psi = 41^\circ$) foi avaliada a curva de desempenho térmico e temperaturas de saída da água, de acordo com o modelo matemático desenvolvido para a cidade de Belo Horizonte, considerando a inclinação de 30° (NBR 12269/2006).

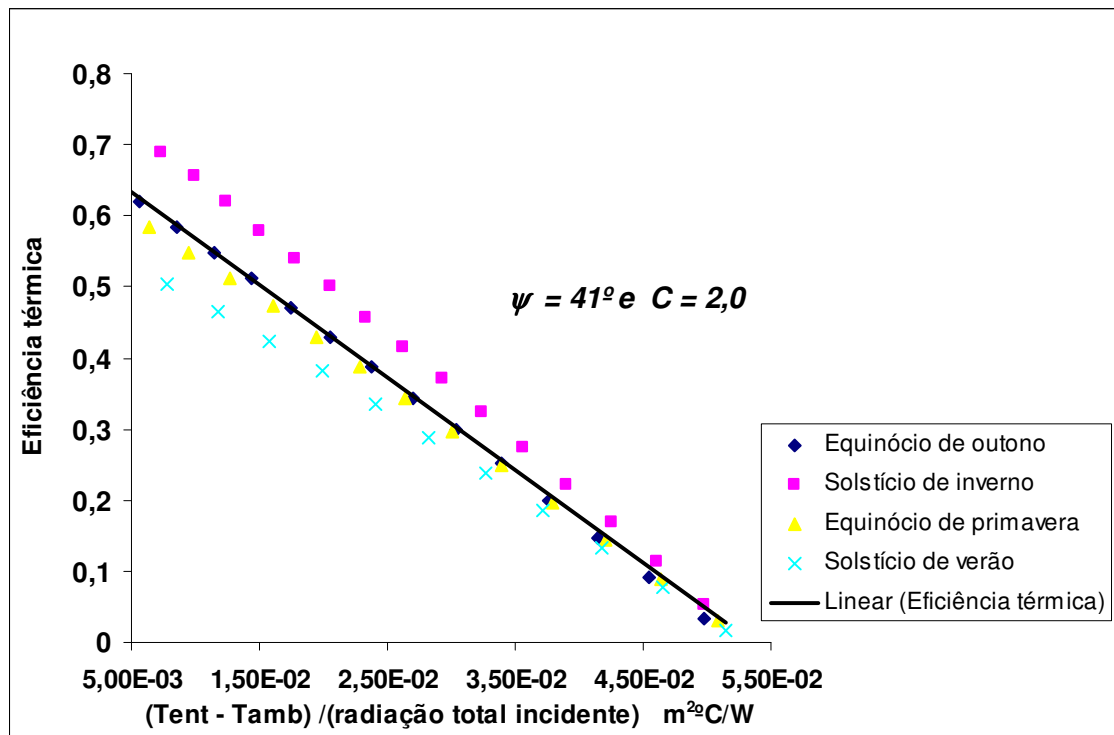


GRÁFICO 6.11 – Curva de desempenho do coletor com cavidades com $C = 2,0$, $\psi = 41^\circ$, para inclinação de 30° , $\dot{m} = 0,04 \text{ kg/s}$ - Cidade de Belo Horizonte.

Os GRA 6.6 e 6.11 possuem comportamentos similares, como esperado. Entretanto, observa-se um ligeiro aumento da eficiência do coletor para períodos em que a inclinação proporciona uma menor coleção de radiação. Por exemplo, no GRA 6.11 para a simulação operacional referente ao equinócio de outono (inclinação do coletor igual a 30°) a eficiência térmica foi ligeiramente superior àquela apresentada no GRA 6.11, em que o coletor com inclinação ótima teve uma maior coleta de radiação. A maior coleção de radiação pelo coletor proposto proporciona o aumento das perdas térmicas reduzindo a eficiência instantânea do equipamento. Adicionalmente, uma menor coleção de radiação é acompanhada de perdas térmicas reduzidas.

TABELA 6.11

Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=2,0$, $\psi=41^\circ$, $\dot{m}=0,04$ kg/s, $\mu=30^\circ$ e coletor constituído de 21 cavidades V).

Hora solar	Equinócio de outono		Solstício de inverno		Equinócio de Primavera		Solstício de verão	
	T_{entrada} ($^\circ\text{C}$)	$T_{\text{saída}}$ ($^\circ\text{C}$)	T_{entrada} ($^\circ\text{C}$)	$T_{\text{saída}}$ ($^\circ\text{C}$)	T_{entrada} ($^\circ\text{C}$)	$T_{\text{saída}}$ ($^\circ\text{C}$)	T_{entrada} ($^\circ\text{C}$)	$T_{\text{saída}}$ ($^\circ\text{C}$)
12:00	23	28,81	18,5	26,23	21	25,97	22,2	25,74
12:10	25	30,52	20,5	27,9	23	27,71	24,2	27,51
12:20	27	32,22	22,5	29,56	25	29,43	26,2	29,27
12:30	29	33,91	24,5	31,2	27	31,14	28,2	31,02
12:40	31	35,59	26,5	32,83	29	32,84	30,2	32,76
12:50	33	37,25	28,5	34,45	31	34,53	32,2	34,49
13:00	35	38,88	30,5	36,01	33	36,18	34,2	36,19
13:10	37	40,51	32,5	37,6	35	37,84	36,2	37,9
13:20	39	42,13	34,5	39,17	37	39,48	38,2	39,59
13:30	41	43,74	36,5	40,73	39	41,12	40,2	41,28
13:40	43	45,35	38,5	42,28	41	42,75	42,2	42,96
13:50	45	46,94	40,5	43,82	43	44,37	44,2	44,63
14:00	47	48,53	42,5	45,36	45	45,99	46,2	46,3
14:10	49	50,11	44,5	46,89	47	47,59	-	-
14:20	51	51,68	46,5	48,41	49	49,19	-	-
14:30	53	53,24	48,5	49,93	-	-	-	-
14:40	-	-	50,5	51,44	-	-	-	-
14:50	-	-	52,5	52,92	-	-	-	-

A TAB 6.11 representa a temperatura do coletor composto por cavidades tipo V com $C = 2,0$ e $\psi = 41^\circ$ e inclinação de 30° . Comparando as TAB 6.1 e 6.11, observa-se uma pequena redução de $T_{\text{saída}}$ para os valores apresentados nesta última tabela. Isto se deve ao menor fluxo de radiação no coletor para a inclinação de 30° considerada relativa a TAB 6.11 em relação as inclinações ótimas apresentadas na TAB 5.4 e utilizadas na obtenção da TAB 6.1.

TABELA 6.12

Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=2,0$, $\psi=41^\circ$, $\dot{m}=0,02$ kg/s, $\mu=30^\circ$ e coletor constituído de 21 cavidades).

Hora solar	Equinócio de outono		Solstício de inverno		Equinócio de Primavera		Solstício de verão	
	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)	T_{entrada} (°C)	$T_{\text{saída}}$ (°C)
12:00	23	34,18	18,5	33,37	21	30,59	22,2	29,03
12:10	25	35,62	20,5	34,71	23	32,06	24,2	30,58
12:20	27	37,03	22,5	36,03	25	33,52	26,2	32,11
12:30	29	38,42	24,5	37,33	27	34,95	28,2	33,62
12:40	31	39,78	26,5	38,6	29	36,36	30,2	35,11
12:50	33	41,13	28,5	39,86	31	37,75	32,2	36,59
13:00	35	42,4	30,5	41,02	33	39,08	34,2	38,01
13:10	37	43,69	32,5	42,21	35	40,41	36,2	39,44
13:20	39	44,97	34,5	43,39	37	41,74	38,2	40,86
13:30	41	46,22	36,5	44,54	39	43,04	40,2	42,26
13:40	43	47,46	38,5	45,69	41	44,33	42,2	43,65
13:50	45	48,69	40,5	46,81	43	45,61	44,2	45,02
14:00	47	49,9	42,5	47,93	45	46,87	46,2	46,39
14:10	49	51,1	44,5	49,03	47	48,12	-	-
14:20	51	52,29	46,5	50,12	49	49,36	-	-
14:30	53	53,46	48,5	51,2	-	-	-	-
14:40	-	-	50,5	52,27	-	-	-	-
14:50	-	-	52,5	53,3	-	-	-	-

As TAB 6.2 e 6.12 possuem diferenças que se justificam pela mesma proposição do parágrafo anterior para as TAB 6.1 e 6.11.

O coletor com $C = 4,4$ e $\psi = 25^\circ$ apresenta-se com 10 cavidades. Esta configuração abrange o mesmo número de tubos utilizado em alguns coletores planos comerciais. Por tal motivo é apresentado à curva de eficiência térmica deste coletor (GRA 6.11).

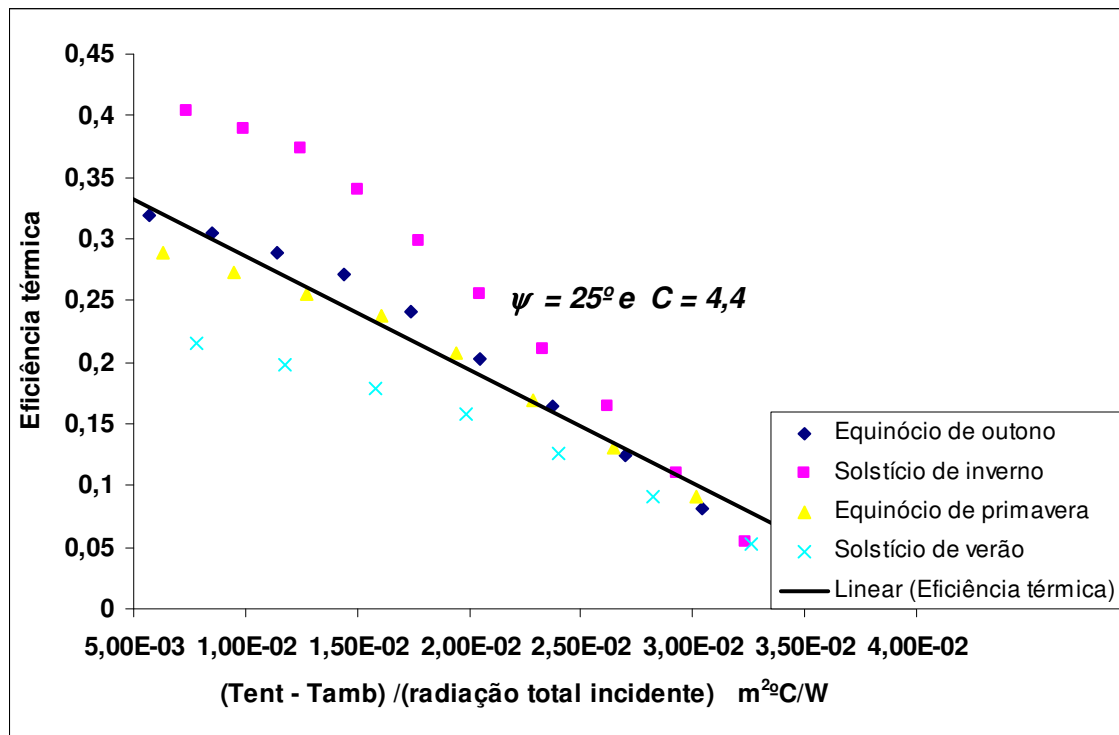


GRÁFICO 6.12 – Curva de desempenho do coletor com $C = 4,4$, $\psi = 25^\circ$ para inclinação de 30° , $\dot{m} = 0,02$ kg/s - Cidade de Belo Horizonte.

As temperaturas de saída da água para o coletor mostrado no GRA 6.12 são apresentadas nas TAB 6.13 e 6.14. Baixos níveis desta temperatura são atingidos para a vazão de $0,04\text{kg/s}$. Entretanto, para esta vazão as perdas térmicas são reduzidas se comparadas à vazão de $0,02\text{kg/s}$ (GRA 6.10 e 6.12).

TABELA 6.13

Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=4,4$, $\psi= 25^\circ$, $\dot{m} = 0,04\text{ kg/s}$, coletor constituído de 10 cavidades).

Hora solar	Equinócio de outono		Solstício de inverno		Equinócio de Primavera		Solstício de verão	
	$T_{\text{entrada}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{saída}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{entrada}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{saída}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{entrada}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{saída}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{entrada}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{saída}} (^{\circ}\text{C})$
12:00	23	25,93	18,5	22,86	21	23,41	22,2	23,71
12:10	25	27,82	20,5	24,72	23	25,3	24,2	25,62
12:20	27	29,69	22,5	26,58	25	27,18	26,2	27,51
12:30	29	31,56	24,5	28,42	27	29,06	28,2	29,4
12:40	31	33,41	26,5	30,26	29	30,92	30,2	31,28
12:50	33	35,26	28,5	32,08	31	32,77	32,2	33,15
13:00	35	36,98	30,5	33,73	33	34,53	34,2	34,96
13:10	37	38,66	32,5	35,31	35	36,24	36,2	36,73
13:20	39	40,32	34,5	36,88	37	37,95	38,2	38,51
13:30	41	41,99	36,5	38,45	39	39,65	40,2	40,27
13:40	43	43,64	38,5	40	41	41,34	-	-
13:50	45	45,26	40,5	41,5	43	43	-	-

TABELA 6.14

Temperatura de saída da água do coletor composto por cavidades tipo V para os equinócios e solstícios ($C=4,4$, $\psi= 25^\circ$, $m= 0,02$ kg/s, coletor constituído de 10 cavidades).

Hora solar	Equinócio de outono		Solstício de inverno		Equinócio de Primavera		Solstício de verão	
	$T_{entrada}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{saída}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{entrada}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{saída}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{entrada}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{saída}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{entrada}$ ($^\circ\text{C}$)	$T_{saída}$ ($^\circ\text{C}$)
12:00	23	28,75	18,5	27,03	21	25,73	22,2	25,17
12:10	25	30,52	20,5	28,76	23	27,51	24,2	26,97
12:20	27	32,26	22,5	30,46	25	29,27	26,2	28,77
12:30	29	33,99	24,5	32,15	27	31,02	28,2	30,54
12:40	31	35,7	26,5	33,82	29	32,74	30,2	32,31
12:50	33	37,4	28,5	35,47	31	34,46	32,2	34,06
13:00	35	38,86	30,5	36,79	33	35,98	34,2	35,68
13:10	37	40,22	32,5	37,96	35	37,41	36,2	37,24
13:20	39	41,57	34,5	39,13	37	38,84	38,2	38,79
13:30	41	42,92	36,5	40,28	39	40,25	40,2	40,34
13:40	43	44,25	38,5	41,42	41	41,66	-	-
13:50	45	45,5	40,5	42,43	43	43	-	-
14:00	-	-	42,5	43,43	-	-	-	-

Para a inclinação de 30° relativa à cidade de Belo Horizonte pode ser observado nas TAB 6.13 e 6.14 que o coletor proposto ($C = 4,4$ e $\psi = 25^\circ$) opera até cerca de 14 horas para solstícios de inverno. Para os demais dias avaliados este coletor tem seu período de coleta de radiação solar reduzido. O coletor proposto deve operar em condições estacionárias para que não haja custos associados a rastreamento. Este fato também aponta a desvantagem do coletor proposto em relação aos coletores planos convencionais. Estes últimos operam sem acompanhar a trajetória do sol e ainda coletam a radiação praticamente todo o dia.

6.4 Estimativas de custos dos coletores com cavidades V

Os custos relacionados ao coletor proposto no presente estudo estão diretamente relacionados à geometria das cavidades tipo V empregadas. A geometria destas cavidades determina a altura do coletor, bem como a área do refletor a ser utilizada.

A cobertura transparente do coletor é em vidro comercial comum (“green glass”) com 3 mm de espessura, cujo preço para consumo final foi de cerca de R\$ 40,00 (Data da consulta: 10/01/2009, Empresa: Aluglass Esquadrias e Vidro para Construção Civil). Os espelhos, que constituem os refletores, com 3,0mm de espessura, podem ser adquiridos por um custo de R\$ 90,00/m² (Data da consulta: 10/01/2009, Empresa: Aluglass Esquadrias e Vidro para Construção Civil). O custo final do vidro e das superfícies refletoras foi acrescido

de 10% para corte e acabamento por parte do vendedor. As larguras dos refletores mostradas nas TAB 6.15 a 6.19 são multiplicadas pelo comprimento do coletor para a obtenção da área de cada superfície e, sabendo que cada cavidade contém dois refletores obtém-se a quantidade de material utilizado e seu custo. Para a caixa do coletor propõe-se alumínio com 1,0 mm de espessura, cujo custo é da ordem de R\$ 83,00 (Data da consulta: 10/01/2009, Empresa: Aluglass Esquadrias e Vidro para Construção Civil) para uma placa comercial de 2m². O preço de mercado para tubo em cobre de 15 mm de diâmetro externo e 0,5 mm de espessura (CLASSE E) é de cerca de R\$ 11,00 por metro linear (Data da consulta: 30/03/2009, Empresa: Casa & Construção). Custos de fabricação e montagem (soldagem, tratamento superficial dos tubos com pintura, mão-de-obra e demais materiais destinados a montagem do equipamento) foram considerados da ordem de 30% sobre o custo de aquisição dos materiais construtivos.

TABELA 6.15
Tabela análise de custo $C = 2,0$, número de cavidades igual a 21

$\psi(^{\circ})$	Altura do coletor (cm)	Largura da superfície refletora (cm)	Custo (R\$)
25	5,0	5,5	1.360,00
27	4,5	5,1	1.320,00
29	4,2	4,8	1.290,00
31	3,8	4,5	1.260,00
33	3,6	4,2	1.230,00
35	3,3	4,0	1.210,00
37	3,1	3,8	1.190,00
39	2,9	3,7	1.170,00
41	2,7	3,5	1.150,00

TABELA 6.16
Tabela análise de custo $C = 2,8$ número de cavidades igual a 15

$\psi (^{\circ})$	Altura do coletor (cm)	Largura da superfície refletora (cm)	Custo (R\$)
25	7,1	7,8	1.200,00
27	6,5	7,3	1.160,00
29	6,0	6,8	1.130,00
31	5,5	6,4	1.100,00
33	5,1	6,1	1.070,00
35	4,7	5,8	1.050,00
37	4,4	5,5	1.030,00
39	4,1	5,2	1.010,00
41	3,8	5,0	990,00

TABELA 6.17
Tabela análise de custo C = 3,6 número de cavidades igual a 11

ψ (°)	Altura do coletor (cm)	Largura da superfície refletora (cm)	Custo (R\$)
25	9,1	10,0	1.120,00
27	8,3	9,3	1.080,00
29	7,7	8,7	1.040,00
31	7,1	8,2	1.010,00
33	6,5	7,8	990,00
35	6,1	7,4	970,00
37	5,6	7,0	950,00
39	5,2	6,7	930,00
41	4,7	6,2	910,00

TABELA 6.18
Tabela análise de custo C = 4,0 número de cavidades igual a 11

ψ (°)	Altura do coletor (cm)	Largura da superfície refletora (cm)	Custo (R\$)
25	10,1	11,2	1.090,00
27	9,2	10,4	1.050,00
29	8,5	9,7	1.020,00
31	7,8	9,2	990,00
33	7,3	8,7	960,00
35	6,7	8,2	940,00
37	6,3	7,8	920,00
39	5,8	7,5	900,00
41	5,4	7,2	880,00

TABELA 6.19
Tabela análise de custo C = 4,4 número de cavidades igual a 10

ψ (°)	Altura do coletor (cm)	Largura da superfície refletora (cm)	Custo (R\$)
25	11,1	12,3	1.070,00
27	10,2	11,4	1.030,00
29	9,4	10,7	990,00
31	8,6	10,1	960,00
33	8,0	9,5	940,00
35	7,4	9,0	910,00
37	6,9	8,6	890,00
39	6,4	8,2	880,00
41	6,0	7,9	860,00

Nas TAB 6.15 a 6.19 são observados que para a razão de concentração constante e ψ crescente a altura do coletor solar composto por cavidades tipo V é aumentada. A largura dos refletores que compõe cada cavidade concentradora tipo V também aumenta com o aumento do semi-ângulo do vértice. Estes acréscimos de materiais (vidro e alumínio) com o aumento de ψ promovem o aumento do custo do equipamento.

Uma diferença básica entre coletores planos convencionais e concentradores consiste na forma de transferência de calor para o tubo absorvedor. Nos coletores solares planos, esta transferência ocorre por condução no conjunto de aletas (denominado de superfície absorvedora). Nos concentradores, os refletores são responsáveis pela reflexão da radiação para o absorvedor. Deste modo, a diferença de material nos coletores planos e nos coletores concentradores com cavidades V envolve o conjunto de aletas e o isolante térmico de fundo, no coletor plano, e os espelhos planos nas cavidades V.

A título de comparação, para confecção de um coletor solar plano convencional (configuração mostrada na FIG. 2.1 do capítulo 2) com 9 tubos absorvedores, altura de 7 cm e 2 m² de área de coleta, estima-se um custo de R\$ 838,65. No comércio é possível encontrar estes coletores planos (com produção seriada) na faixa de preços de R\$ 553,35 a R\$ 753,50 (Data da consulta: 30/03/2009, Empresa: Casa & Construção).

Focando-se, agora, o coletor proposto ($C = 2,0$ e $\psi = 41^\circ$), observa-se um custo elevado, em torno de R\$ 1.155,19, valor bem superior ao custo de coletores planos comerciais com igual área considerada (2,0 m²). Além disto, os custos de outros concentradores com cavidades V (TAB 6.11 a 6.15) podem parecer menores, porém referem-se a dispositivos de baixa eficiência térmica, em comparação com coletores de placa plana comerciais com mesma dimensão e número de tubos absorvedores. A redução de custo para a confecção de coletores solares compostos por cavidades V pode ocorrer com a produção em larga escala dos mesmos, no entanto ainda representará valores que dificultarão sua competitividade com os dispositivos planos convencionais. Um aumento da eficiência térmica dos concentradores é possível utilizando a técnica de rastreamento do sol, isto, porém, introduz um acréscimo nos custos.

6.5 Considerações finais

Os resultados apresentados neste capítulo apontam o coletor solar composto por cavidades V inadequado para aquecimento de água para uso doméstico. Tal fato se deve à abrupta queda da eficiência óptica para a radiação direta para períodos afastados do meio-dia solar. Este fato influencia diretamente a eficiência térmica do sistema. Esta perda de eficiência poderia ser compensada por sistema de rastreamento solar, entretanto, os custos do coletor proposto

se tornariam ainda mais elevados. Contudo, determinadas configurações dos coletores compostos por cavidades V estudados podem superar os coletores planos do tipo placa e tubo em termos de eficiência quando associados a sistemas de rastreo solar (GRA 6.13). Este rastreo contribui para a incidência da radiação solar aproximadamente normal ao plano do coletor de forma a manter sempre elevada a eficiência ótica e conseqüentemente a eficiência térmica.

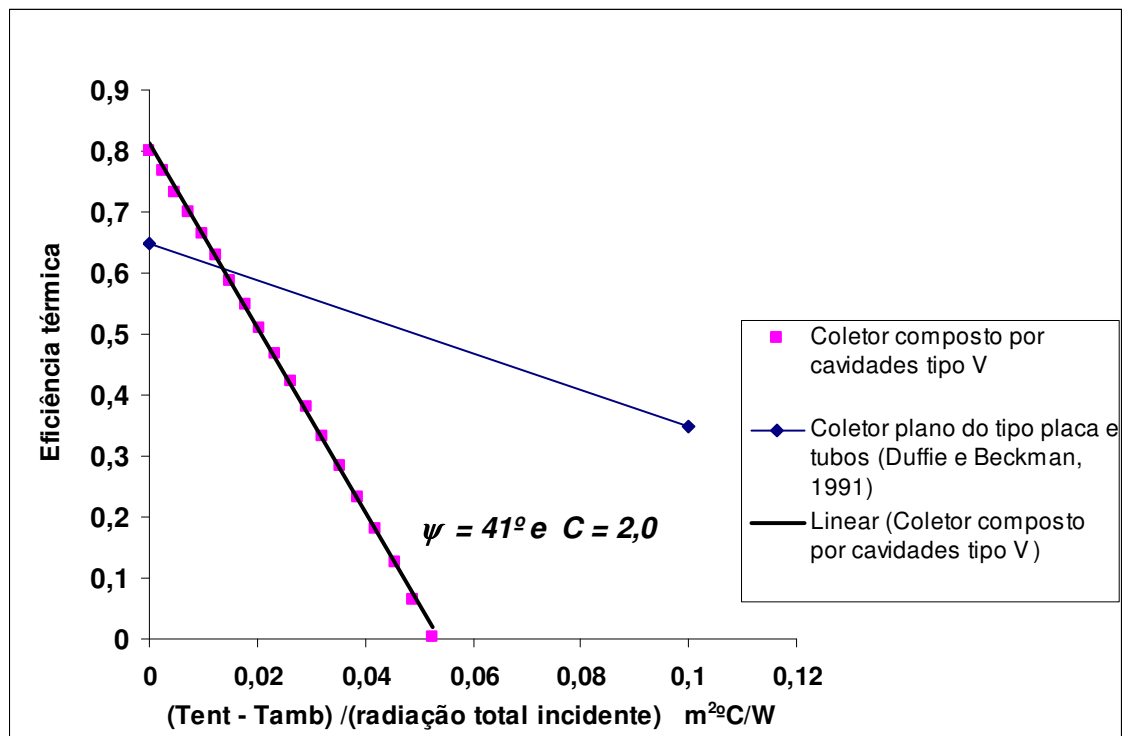


GRÁFICO 6.13 – Comparação do desempenho do coletor proposto por cavidades V ($C = 2,0$, $\psi = 41^\circ$; simulação no solstício de inverno) com o coletor plano do tipo placa e tubos.

Das configurações avaliadas para o coletor proposto, melhores resultados foram obtidos para o coletor formado por cavidades V com $C = 2,0$ e $\psi = 41^\circ$. Entretanto este coletor tem um custo elevado se comparado a coletores solares planos, do tipo placa e tubos, disponíveis no mercado.

7. CONCLUSÕES

O aquecimento solar de água, no Brasil, tem sido feito, normalmente, com o uso de coletores solares planos do tipo placa-e-tubos, cuja tecnologia é amplamente conhecida e dominada. Como uma alternativa aos coletores planos convencionais propôs-se, neste trabalho, uma configuração de coletor composto por cavidades concentradoras do tipo V, o que exigiu um estudo de viabilidade técnica e estimativas de custos de fabricação desses dispositivos.

Cavidades concentradoras tipo V podem ser associadas a absorvedores cilíndricos posicionados próximo ao vértice. A radiação solar que incide na abertura destas cavidades é direcionada aos tubos absorvedores, nos quais um fluido escoia internamente. Várias cavidades V associadas a tubos interconectados são dispostas em paralelo e inseridas em uma caixa prismática. Nesta estrutura, as cavidades V são organizadas de modo que sua abertura é voltada a uma das faces desta caixa, constituída de material transparente e direcionada à incidência de radiação solar. Esta configuração dá origem ao coletor solar composto por cavidades concentradoras tipo V.

O estudo da viabilidade técnica para aquecimento de água para uso residencial com coletor composto por cavidades V, desenvolvido neste trabalho, abrange uma análise de eficiência ótica e térmica, através de um modelo matemático para o comportamento da radiação e dos fluxos de calor no dispositivo. A eficiência ótica foi descrita em termos de parâmetros físicos das cavidades tipo V, em destaque razão de concentração, C , e semi-ângulo do vértice, ψ . A análise térmica foi baseada numa metodologia aplicada a concentradores parabólicos compostos (CPC), com base em balanços de energia, em regime permanente, para os componentes do coletor. A implementação computacional do modelo matemático foi realizada através do software *EES* (Engineering Equation Solver). A partir de dados meteorológicos disponíveis para a cidade de Belo Horizonte/MG, a análise de desempenho térmico de várias configurações geométricas foi realizada tendo-se em mente uma relação de custo-benefício favorável sob o aspecto construtivo.

Simulações matemáticas de diversas configurações geométricas de coletor com cavidades V indicaram, para o aquecimento de água doméstico, sua baixa competitividade técnico-econômica em comparação a coletores solares planos convencionais. Os custos dos coletores compostos por cavidades V para atendimento residencial mostraram-se elevados

perante coletores planos do tipo placa e tubos disponíveis no mercado. Sob perspectiva operacional, os coletores propostos apresentam um decaimento mais acentuado na captação da radiação solar nos períodos do dia mais afastados do meio-dia, o que se traduz numa redução relativamente significativa de eficiências ótica e térmica. Os coletores planos comerciais tendem a coleccionar a radiação solar de maneira mais eficiente a maior parte do dia. Entretanto, cavidades V com razão de concentração próxima da unidade ($25^\circ \leq \psi \leq 41^\circ$ e $C = 2,0$) apresentaram valores elevados de eficiência ótica para radiação solar incidente com direções próximas da normal ao plano do coletor.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõem-se o estudo de cavidades tipo V operando com rastreo e a avaliação do desempenho de coletores solares com cavidades V com um número tubos absorvedores por cavidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ASHRAE Standart 93-77. “*Methods of Testing to determine the thermal Performance of Solar Collectors*”. ASHRAE, 345 East 47th Street, New York, N. Y. 10017, 1977 apud Zilles, R., “*Comparação experimental de testes de coletores solares planos com simulador e com radiação solar*”. Cap. 3, p. 29-30, 1987. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia/Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 2 Baranov, V. K., Original publicado na revista *Geliotekhnika*, vol. 2, p. 11-14, 1966. Tradução com o título “*Parabolotoroidal mirrors as elements of solar energy concentrators*”, *Applied Solar Energy*. vol. 2, p. 9-12 apud Fraidenaich, N., “*Estudo teórico-experimental de um sistema fotovoltaico acoplado a concentradores tipo V*”. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 7-218, 1994.
- 3 Burmeister, L. C., “*Convective heat transfer*”. 2^a Edição, Editora Jonh Wiley & Sons, Inc., New York, Estados Unidos da América, cap. 4, p. 107-133, 1993.
- 4 Carvalho, M. J.; Collares Pereira, M.; Gordon, J. M. and Rabl, A., “*Truncation of CPC solar collectors and its effect on energy collection*”. *Solar Energy*, vol. 35, p. 393-399, 1985 apud Fraidenaich, N., “*Estudo teórico-experimental de um sistema fotovoltaico acoplado a concentradores tipo V*”. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 7-218, 1994.
- 5 CEMIG, “*Energia Solar para Aquecimento de Água. Instruções para Projetistas e Instaladores.*” Belo Horizonte/MG. Agosto de 1995.
- 6 Collares Pereira, M., Rabl, A. and Winston, R., “*Lens-mirror combinations with maximal concentration*”. *Applied Optics*, vol. 16, p. 2677-2683, 1977 apud Fraidenaich, N., “*Estudo teórico-experimental de um sistema fotovoltaico acoplado a concentradores tipo V*”. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 7-218, 1994.

- 7 Collares Pereira, M. and Rabl, A., “*Simple procedure for predicting long term average performance of nonconcentrating and concentrating solar collectors*”. Solar Energy, vol. 23, p. 235-253, 1979 apud Duffie, J. A. e Beckman, W. A., “*Solar engineering of thermal processes*”. 2ª Edição, Editora John Wiley & Sons, Inc., New York, Estados Unidos da América, p.11-349, 1991.
- 8 Collares-Pereira, M. and A. Rabl, “*The Average Distribution of Solar Radiation – Correlations between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values*”. Solar Energy, vol. 22, p. 155, 1979 apud Duffie, J. A. e Beckman, W. A., “*Solar engineering of thermal processes*”. 2ª Edição, Editora John Wiley & Sons, Inc., New York, Estados Unidos da América, p.11-349, 1991.
- 9 Cooper, P. I., “*Solar Absorption of Solar Radiation in Solar Stills*”. Solar Energy, vol. 12, p. 439, 1983 apud Duffie, J. A. e Beckman, W. A., “*Solar engineering of thermal processes*”. 2ª Edição, Editora John Wiley & Sons, Inc., New York, Estados Unidos da América, p.11-349, 1991.
- 10 Duffie, J.A and Beckman, W. A. “*Solar energy thermal processes*”. New York, John Wiley & Sons, Inc., p. 762, 1980 apud Leão, P. C. A., “*Projeto, construção e análise do desempenho de um concentrador parabólico composto. Simulação e resultados experimentais*”. Cap. 3, p. 13-20, p. 70, 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia/Universidade Federal de Minas Gerais.
- 11 Duffie, J. A. e Beckman, W. A., “*Solar engineering of thermal processes*”. 2ª Edição, Editora John Wiley & sons, inc., New York, Estados Unidos da América, p.11-349, 1991.
- 12 Fraidenraich, N. e Almeida, G. J., “*Propriedades óticas de concentradores tipoV*”. IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, 1987.
- 13 Fraidenraich, N., “*Analytic solutions and numerical results for the optical and radiative properties of v-trough concentrators.*” SPIE, Vol. 1528, Nonimaging Optics. Maximum Efficiency Light Transfer, Recife, PE, 1991.
- 14 Fraidenraich, N. e Almeida, G. J., “*Optical properties of V-trough concentrators*”. Solar Energy, Vol. 47, Nº 3, pp. 147 – 155, Estados Unidos da América, 1991.

- 15 Fraidenraich, N., “*Estudo teórico-experimental de um sistema fotovoltaico acoplado a concentradores tipo V*”. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 7-218, 1994.
- 16 Fraidenraich, N., “*Design Procedure of V-trough Cavities for Photovoltaic Systems*”. Progress in photovoltaics: Research and applications, Vol. 6, p. 43 – 54, Recife, PE, Brazil, 1998.
- 17 Garg, H. P., “*Advances in Solar Energy Technology*”. V. 2. Editora D. Reidel publishing company. Estados Unidos da América, cap. 4, p. 285, 1987.
- 18 Georlete, O. and Gordon, J. M., “*Generalized nonimaging compound elliptical and compound hyperbolic luminaire designs for pair-overlap illumination applications*” Applied optics, vol. 33, p. 4171-4178(1994) apud Fraidenraich, N., “*Estudo teórico-experimental de um sistema fotovoltaico acoplado a concentradores tipo V*”. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 7-218, 1994.
- 19 Gnoatto E., Dallacort, R., Ricieri, R. P., Silva, S. L. e Ferruzi, Y. “*Eficiência de um conjunto fotovoltaico em condições reais de trabalho na região de Cascavel*”. Acta Sci. Technol, vol. 30, nº 2, p. 215-219, Maringá, 2008.
- 20 Guimarães, A. P. C., “*Estudo Solarimétrico com base na definição de Mês Padrão e seqüência de radiação diária*”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Cap. 4, p. 97-98, 1995.
- 21 Hollands, K. G. T., “*A concentrator for thin-film solar cells*”. Solar Energy, vol. 13, p. 149 – 163, Great Britain, 1971.
- 22 Holman, J. P. “*Transferência de Calor*”. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, p. 639, 1983 apud Leão, P. C. A., “*Projeto, construção e análise do desempenho de um concentrador parabólico composto. Simulação e resultados experimentais*”. Cap. 3, p. 13-20, p. 70, 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia/Universidade Federal de Minas Gerais.

- 23 Howell J. R. and Bannerot, R. B., “*Trapezoidal grooves as moderately concentrating solar energy collectors*”. Progress in Astronautics and Aeronautics, vol. 49, p. 277-289, 1976 apud Fraidenraich, N., “*Estudo teórico-experimental de um sistema fotovoltaico acoplado a concentradores tipo V*”. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 7-218, 1994.
- 24 Hsieh, C. K.,” *Thermal analysis of CPC collectors*”. Solar Energy , vol. 27, p. 19- 29, Great Britain, 1981.
- 25 Incropera, F. P. e Witt D. P., “*Fundamentos de transferência de calor e massa*”. 3ª Edição, Rio de Janeiro, Guanabara koogan, Cap. 13, p. 375, 1992.
- 26 Kalogirou, S. A., “Solar thermal collectors and applications”. Progress in Energy and Combustion Science, vol. 30, p. 231–295, 2004.
- 27 Kreith, F. and Kreider, J. . “*Principles of solar engineering*”. Washington, Hemisphere Publishing Corporation, p. 778, 1978 apud Leão, P. C. A., “*Projeto, construção e análise do desempenho de um concentrador parabólico composto. Simulação e resultados experimentais*”. Cap. 3, p. 13-20, p. 70, 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia/Universidade Federal de Minas Gerais.
- 28 Kreith, F. “*Princípios da Transmissão de Calor*”. São Paulo, Edgard Blücher Ltda., p. 550, 1977 apud Leão, P. C. A., “*Projeto, construção e análise do desempenho de um concentrador parabólico composto. Simulação e resultados experimentais*”. Cap. 3, p. 13-20, p. 70, 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia/Universidade Federal de Minas Gerais.
- 29 Keppeler, R. O. and Corbella, O. D. “*Características óticas de coberturas de coberturas solares*”. Congresso Latino-Americano de Energia Solar, 2, João Pessoa, 1979. Atas... João Pessoa, UFPB, vol. 2, p. 321-43, 1979 apud Leão, P. C. A., “*Projeto, construção e análise do desempenho de um concentrador parabólico composto. Simulação e resultados experimentais*”. Cap. 3, p. 13-20, p. 70, 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia/Universidade Federal de Minas Gerais.

- 30 Leão, P. C. A., “Projeto, construção e análise do desempenho de um concentrador parabólico composto. Simulação e resultados experimentais”. Cap. 3, p. 13-20, p. 70, 1989. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia/Universidade Federal de Minas Gerais.
- 31 Liu, B. Y. H. and R. C. Jordan, “The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar Heat Collectors”. Solar Energy, vol. 7, p. 53, 1963 apud Duffie, J. A. e Beckman, W. A., “Solar engineering of thermal processes”. 2ª Edição, Editora John Wiley & Sons, Inc., New York, Estados Unidos da América, p.11-349, 1991.
- 32 Mannan, K. D e Bannerot, R. B., “Optimal geometries for one – and two-faced symmetric side-wall booster mirrorst”. Solar Energy, vol. 21, p. 385 – 391, Great Britain, 1978.
- 33 McAdams, W. H., “Heat Transmission”. 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1964 apud Duffie, J. A. e Beckman, W. A., “Solar engineering of thermal processes”. 2ª Edição, Editora John Wiley & Sons, Inc., New York, Estados Unidos da América, p.11-349, 1991.
- 34 NBR 12269, “Instalação de sistemas de aquecimento solar de água em circuito direto – Procedimento”, Cap. 5, p.6, 2006.
- 35 Niemeyer, R. C., “Construção de um coletor solar inflável” 2006. Monografia (Curso de Engenharia Mecânica) – Faculdade de Tecnologia/Universidade de Brasília.
- 36 Ploke, M., “Lichtführungseinrichtungem mit starker Konzentrationswirkung”. Optik, vol. 25, p. 31-43, 1976 apud Fraidenraich, N., “Estudo teórico-experimental de um sistema fotovoltaico acoplado a concentradores tipo V”. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 7-218, 1994.
- 37 Rabl, A., “Comparison of solar concentrators”. Solar Energy, vol. 18, p. 93-111, 1976 apud Fraidenraich, N. e Almeida, G. J., “ Propriedades óticas de concentradores tipoV”. IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Florianópolis, SC, 1987.
- 38 Rabl, A., “Optical and thermal properties of compound parabolic concentrators”. Solar Energy, vol. 18 p. 497 – 511, Great Britain, 1976.

- 39 Santos, M. A., "*Inventário de emissões de gases de efeito estufa derivadas de hidrelétricas*". Cap. 1, p.1, 2000. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós – Graduação e Pesquisa de Engenharia/ Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- 40 Sprenger, R. L., "*Aplicação do sistema fechado no aquecedor solar de água de baixo custo para reservatórios residenciais isolados termicamente: concepção e comissionamento de um sistema – piloto de testes*". Cap. 1, p. 1, 2007. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Setor de Tecnologia/Universidade Federal do Paraná.
- 41 Tabor, H., "*Stationary mirror system of solar collectors*". Solar Energy, vol. 2, p. 27-33, 1958 apud Fraidenraich, N., "*Estudo teórico-experimental de um sistema fotovoltaico acoplado a concentradores tipo V*". Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 7-218, 1994.
- 42 Welford, T. and Winston, R., "*High collection nonimaging optics*". Academic Press, San Diego, 1989 apud Fraidenraich, N., "*Estudo teórico-experimental de um sistema fotovoltaico acoplado a concentradores tipo V*". Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 7-218, 1994.
- 43 Williamson, D. E., "*Cone Chanel condenser optics*". Journal of the Optical Society of America, vol. 42, p. 712-715, 1952 apud Fraidenraich, N., "*Estudo teórico-experimental de um sistema fotovoltaico acoplado a concentradores tipo V*". Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 7-218, 1994.
- 44 Winston, R., "*Light collection within the framework of geometrical optics*". Journal of the Optical Society of America, vol. 60, p. 245-247, 1970 apud Fraidenraich, N., "*Estudo teórico-experimental de um sistema fotovoltaico acoplado a concentradores tipo V*". Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 7-218, 1994.
- 45 Zilles, R., "*Comparação experimental de testes de coletores solares planos com simulador e com radiação solar*". Cap. 3, p. 29-30, 1987. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia/Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

APÊNDICE A

Obtenção dos ângulos característicos

O ângulo característico α_k , é obtido utilizando o método das imagens (Item 3.2). A obtenção deste ângulo, assim como os demais ângulos característicos, é realizada utilizando-se equações de recorrência. Desta forma, a dedução aqui apresentada se restringe à obtenção das equações básicas para os ângulos característicos pertencentes ao modo $k = 2$.

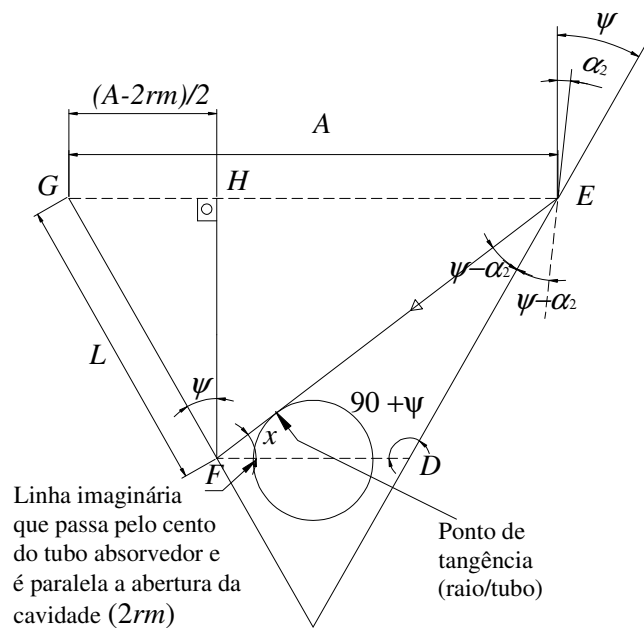


FIGURA A.1 – Esquema de obtenção do ângulo característico α_k .

Do triângulo DEF (FIG A.1), em que $x = 90^\circ + \alpha_2 - 2\psi$, tem-se:

$$\frac{2rm}{\text{sen}(\psi - \alpha_2)} = \frac{L}{\text{cos}(\alpha_2 + 2\psi)} \quad (\text{A.1})$$

Do triângulo FGH (FIG A.1) tem-se:

$$\text{sen}\psi = \frac{A - 2rm}{L} \quad (\text{A.2})$$

Combinando-se a EQ A.1 com a EQ A.2, fica:

$$2\text{sen}\psi \frac{2rm}{A-2rm} = \frac{\text{sen}(\psi - \alpha_2)}{\cos(\alpha_2 + 2\psi)} \quad (\text{A.3})$$

Na EQ A.3, que se refere a $k = 2$ pode ser inserido o conceito de razão de concentração (EQ 4.1), daí

$$\text{sen}\psi \frac{2m}{\pi C - m} = \frac{\text{sen}(\psi - \alpha_2)}{\cos(\alpha_2 + 2\psi)} \quad (\text{A.4})$$

A EQ A.4 pode ser rearranjada de forma a se obter a EQ 4.4 para $k = 2$. Obtendo-se equações similares a EQ A.4, para os demais modos $k = 0$, $k = 1$, $k = 3$, e representado-as de forma geral e fazendo uso de identidades trigonométricas adequadas tem-se a EQ 4.4 na íntegra.

A obtenção do ângulo característico β_k ocorre a partir da EQ. 4.5, e depende de α_k e ψ . A FIG A.2 apresenta a trajetória simétrica destes dois ângulos característicos no interior da cavidade V.

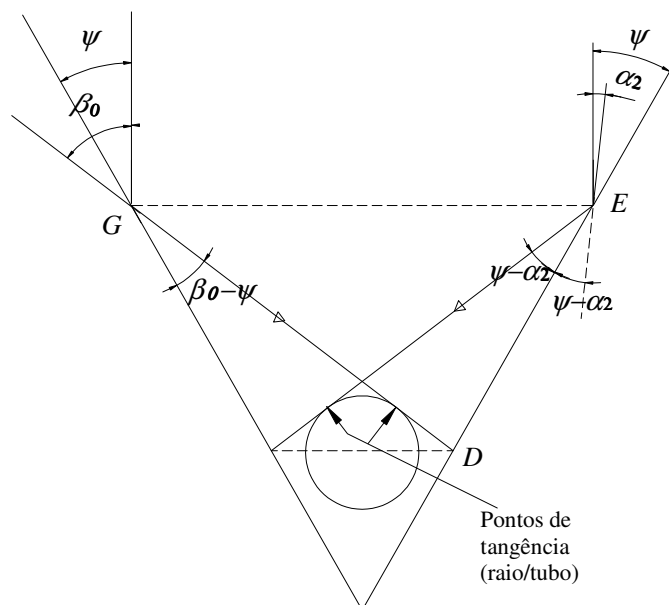


FIGURA A.2 – Esquema de obtenção do ângulo característico β_k .

Da FIG A.2, utilizando-se da relação de simetria no interior da cavidade devido ao comportamento dos raios incidentes com α_2 e β_0 , tem-se:

$$\beta_0 - \psi = \psi - \alpha_2 \quad (\text{A.5})$$

A EQ A.5 refere-se a $k = 0$ para os ângulos β_k e a $k = 2$ para os ângulos α_k . Desta forma esta equação pode ser rearranjada de forma a se obter a EQ. 4.5.

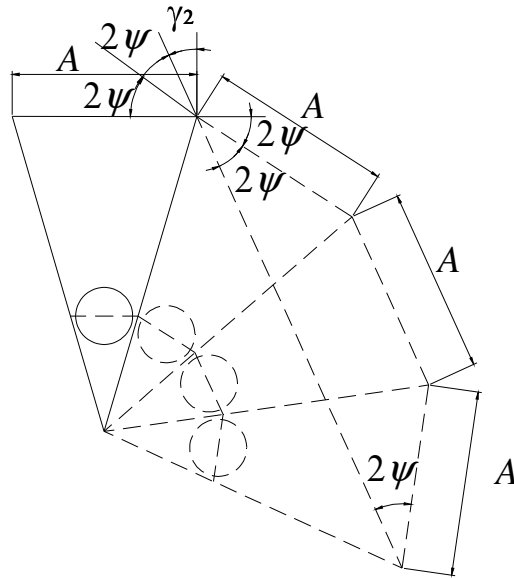


FIGURA A.3 – Esquema de obtenção do ângulo característico β_k .

Da FIG A.3, pode-se obter o ângulo característico γ_2 em função de ψ ,

$$\gamma_2 + 2\psi + 2\psi = 90^\circ \quad (\text{A.6})$$

A EQ. A.6 é equivalente à EQ 4.6 para o modo $k = 2$. A EQ. 4.7 é facilmente obtida a partir da EQ 4.6 substituindo $2k$ por $2k + 1$, o que representa uma reflexão a mais para o retorno da radiação à atmosfera.

APÊNDICE B

Instruções à obtenção das expressões analíticas $P_s(\theta_i)$

B.1 Estado completo

A FIG B.1 apresenta o estado completo, modo $k = 0$, e as informações necessárias para a obtenção da EQ 4.17.

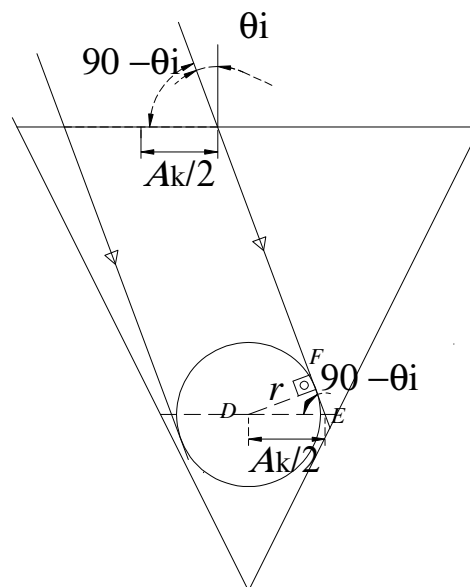


FIGURA B.1 – Esquema de uma cavidade V com absorvedor iluminado no estado considerado completo.

A partir do triângulo DEF , na FIG B.1, tem-se:

$$\frac{r}{\text{sen}(90 - \theta_i)} = \frac{\frac{A_k}{2}}{\text{sen}(90^\circ)} \quad (\text{B.1})$$

A partir da EQ B.1, combinada as EQ 4.1 e 4.10, tem-se a EQ 4.17.

A EQ 4.17 pode apresentar dois intervalos angulares de domínios de acordo com o projeto da cavidade V. Um destes intervalos é obtido pela EQ. 4.18. A FIG B.2 apresenta este intervalo para uma cavidade V qualquer.

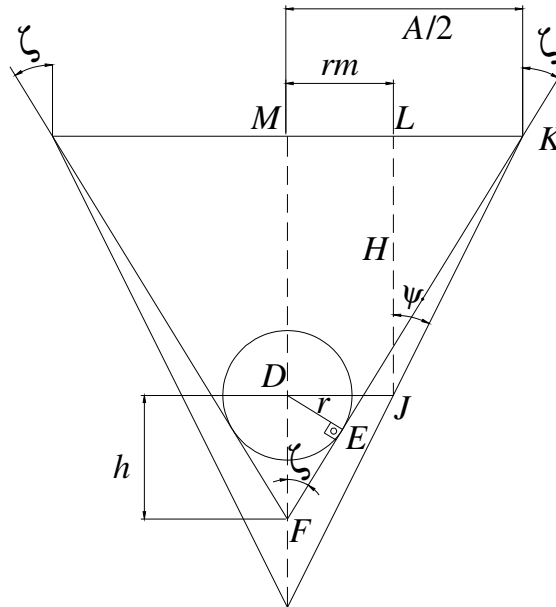


FIGURA B.2 Obtenção do domínio angular $(-\zeta, \zeta)$.

Da FIG B.2, podem ser obtidos h e H , de acordo com as seguintes equações:

Do triângulo DEF ,

$$h = \frac{r}{\text{sen}(\zeta)} \quad (\text{B.2})$$

Do triângulo JKL ,

$$H = \frac{A - 2rm}{2\text{tg}\psi} \quad (\text{B.3})$$

Do triângulo FKM ,

$$\text{tg}\zeta = \frac{A}{2(h + H)} \quad (\text{B.4})$$

As EQ B.2, B.3 e B.4 podem ser combinadas de forma se obter a EQ 4.18.

Nas equações anteriores tem-se $m = (1 + y)$. O parâmetro y é extremamente útil e pode ser obtido a partir da seguinte figura.

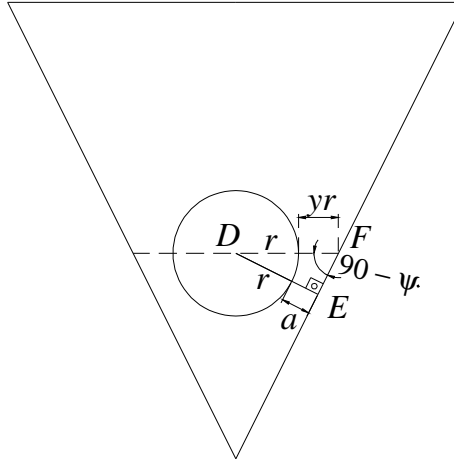


FIGURA B.3 Obtenção do parâmetro y .

Na FIG B.3, a é a mínima distância para que o tubo absorvedor não entre em contato com as superfícies refletoras. Do triângulo DEF nesta figura tem-se,

$$\frac{(r + a)}{\text{sen}(90^\circ - \psi)} = \frac{rm}{\text{sen}(90^\circ)} \quad (\text{B.5})$$

A EQ B.5 pode ser rearranjada de modo a se obter a EQ 4.19.

B.2 Estado ascendente

As equações do estado ascendente são divididas em dois grupos, o primeiro grupo avalia a radiação que atinge o absorvedor interceptando a reta l (FIG 4.4), já o segundo grupo considera a radiação que atinge o absorvedor, mas não intercepta l . Considerando o primeiro grupo, têm-se a radiação representada na FIG B.4.

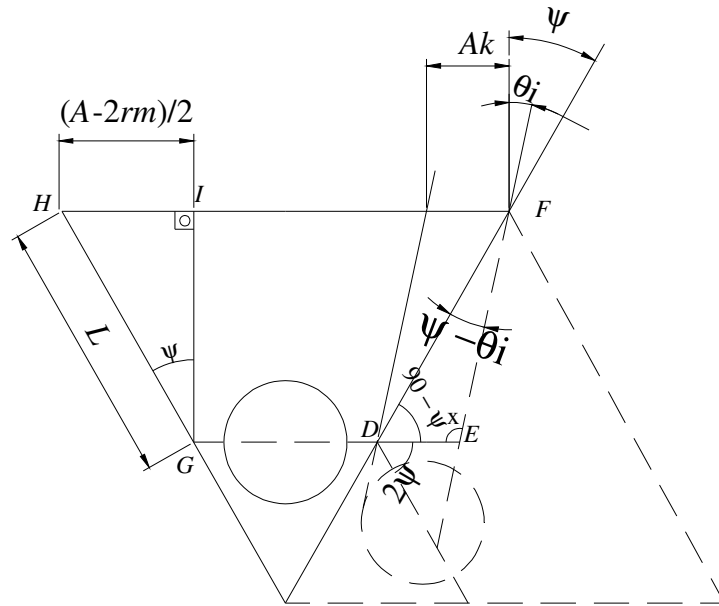


FIGURA B.4 Ilustração do estado ascendente representado pelo primeiro grupo, com $k = 1$.

Na FIG B.4, do triângulo DEF , em que $x = 90^\circ - \theta_i$, tem-se,

$$\frac{A_k}{\text{sen}(\psi - \theta_i)} = \frac{L}{\text{sen}(90^\circ - \theta_i)} \quad (\text{B.6})$$

E do triângulo GHI ,

$$\text{sen}\psi = \frac{\frac{A - 2rm}{2}}{L} \quad (\text{B.7})$$

Com as EQ B.6, B.7, 4.1 e 4.10 obtém-se a EQ 4.20 para $k = 1$, em que $\psi = \alpha_1$ (EQ 4.4). A EQ 4.20 é obtida por várias expressões de recorrência para diferentes modos de reflexão k . Entretanto, o apêndice apresenta a metodologia básica para obtenção dos demais modos.

Parte da radiação que atinge o absorvedor, pertencente ao segundo grupo mencionado (grupo que não intercepta a reta l), é obtida através da EQ 4.21 para o estado ascendente. Esta equação pode ser deduzida com base na FIG B5.

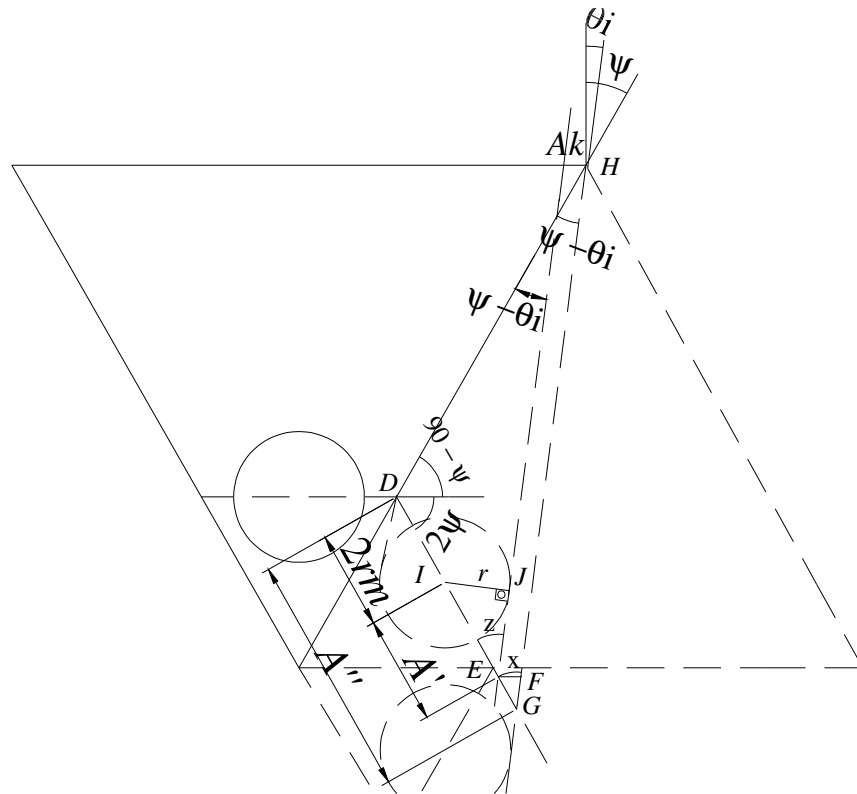


FIGURA B.5 – Estado ascendente, segundo grupo, dedução da EQ. 4.21.

Na FIG B.5, do triângulo DGH com $x = z = 90^\circ + \theta_i - 2\psi$, tem-se:

$$\frac{A''}{\text{sen}(\psi - \theta_i)} = \frac{L}{\text{sen}(90^\circ + \theta_i - 2\psi)} \quad (\text{B.8})$$

E do triângulo EIJ ,

$$\frac{A'}{\text{sen}(90^\circ)} = \frac{r}{\text{sen}(90^\circ + \theta_i - 2\psi)} \quad (\text{B.9})$$

Na FIG B.5, do triângulo EFG , pode ser projetado A_k , desta forma

$$\frac{(A'' - A')}{\text{sen}(90^\circ - \theta_i)} = \frac{A_k}{\text{sen}(90^\circ + \theta_i - 2\psi)} \quad (\text{B.10})$$

As EQ B.7, B.8, B.9, B.10, 4.1 e 4.10 quando associadas resultam na EQ 4.21 para $k = 2$. Esta equação resultante é uma das equações de recorrência para obtenção da EQ. 4.21.

As demais expressões analíticas de $P_s(\theta_i)$ utilizadas no presente estudo são obtidas de forma similar ao mencionado neste apêndice. Entretanto, uma informação adicional se faz necessária. Esta informação refere-se ao cálculo das expressões $P_s(\theta_i)$ para a radiação que realiza um número de reflexões par ou ímpar no interior das cavidades V. O modo de reflexão par é retratado na FIG B.6.

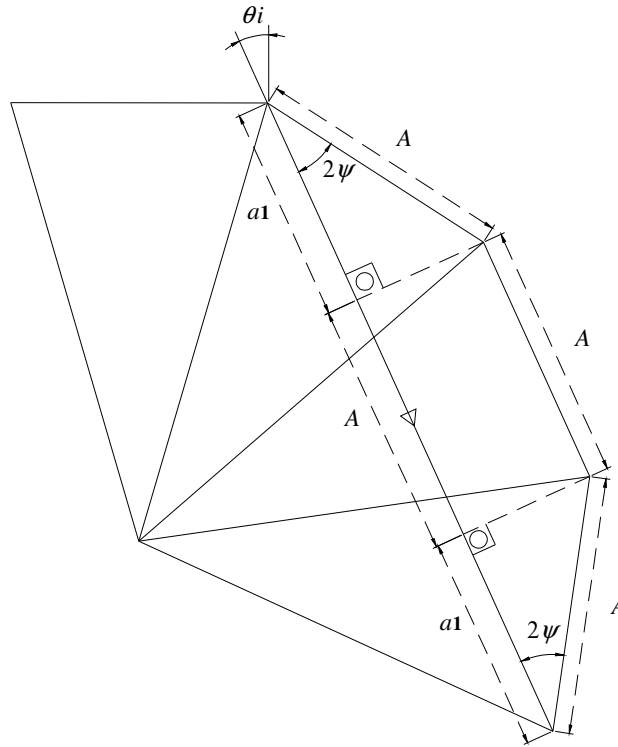


FIGURA B.6 – Comprimento da radiação rejeitada que realiza 3 reflexões reais no interior da cavidade V.

Na FIG B.6, o comprimento da radiação rejeitada, d , que realiza 3 ($k = 2$) reflexões reais no interior da cavidade é igual a $d = (2a_1 + A)$. A obtenção deste comprimento é realizada pela seguinte expressão em função da abertura da cavidade A , do modo de reflexão k e ψ , com base nos triângulos retângulos da FIG B.6.

$$d = A(2 \cos(2\psi) + 1) \quad (\text{B.11})$$

O comprimento citado no parágrafo anterior em relação à radiação rejeitada que sofre 4 reflexões reais ($k = 3$) é representado na FIG B.7.

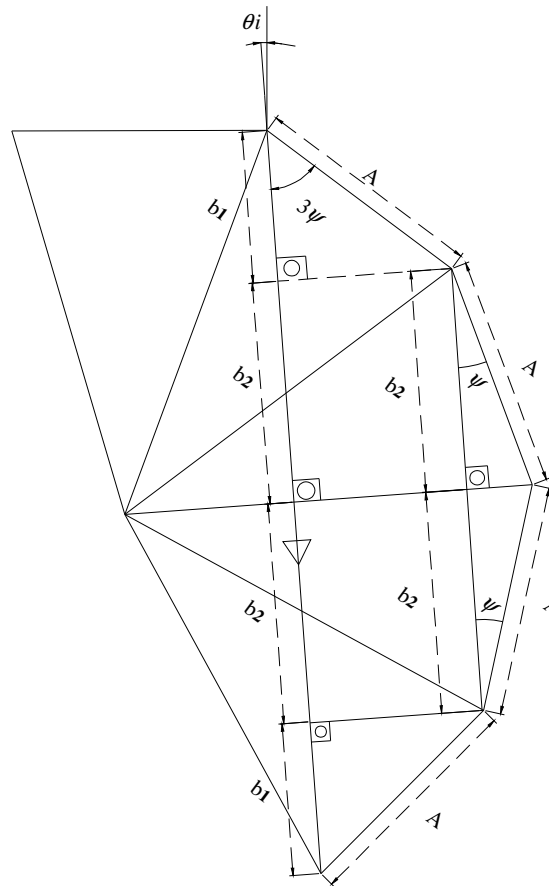


FIGURA B.7 – Comprimento da radiação rejeitada que realiza 4 reflexões reais no interior da cavidade V.

Este comprimento associado à radiação rejeitada com $k = 3$ é igual a $d' = 2b_1 + 2b_2$ e pode ser obtido em função da abertura da cavidade A , do modo de reflexão k e ψ , com base nos triângulos retângulos da FIG B.7.

$$d' = 2A(\cos 3\psi + \cos \psi) \quad (\text{B.12})$$

As demais equações do presente estudo não citadas aqui podem ser obtidas por metodologias similares à apresentada neste apêndice.

APÊNDICE C

TABELA C.1
Propriedades físicas e óticas dos materiais utilizados no coletor solar composto de cavidades tipo V

Componente	Propriedade	Valor	Referências citadas por Leão (1989)
Cobertura	α_c	0,05	Keppeler e Corbella (1979)
	ρ_c	0,088	Keppeler e Corbella (1979)
	τ_c	0,862	Keppeler e Corbella (1979)
	ε_c	0,85	Holman (1983)
Absorvedor	α_a	0,85	Kreith (1977)
	ρ_a	0,10	Kreith (1978)
	ε_a	0,85	Holman (1983)
	ka	$384 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	Kreith (1977)
Refletor	ρ_r	0,82	Fraidenraich (1994)

FONTE – adaptado de Leão (1989).

Nota: Fraidenraich (1994) é a única referencia não citada por Leão (1989) na TAB C.1.