

CLÁUDIA REGINA BARBOSA DA MATTA

DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DO GANHO ADICIONAL DE RADIAÇÃO SOLAR
DIRETA EM UMA SUPERFÍCIE HORIZONTAL PLANA PELO USO DE
REFLETORES SOLARES PLANOS

Tese Apresentada à
Universidade Federal de
Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de
Meteorologia Agrícola, para
Obtenção do Título de
"Magister Scientiae".

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
DEZEMBRO - 1995

BIBLIOTECA
DEPTO. ENGENHARIA AGRÍCOLA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

M435d
1995

Matta, Cláudia Regina Barbosa da, 1966-

Determinação analítica do ganho adicional de radiação solar direta em uma superfície horizontal plana pelo uso de refletores solares planos / Cláudia Regina Barbosa da Matta. – Viçosa : UFV, 1995.

75p. : il.

Orientador: Adil Rainier Alves.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

1. Coletor solar - Ganho de energia. 2. Refletor solar. 3. Radiação solar. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD. 18. ed. 551.5271

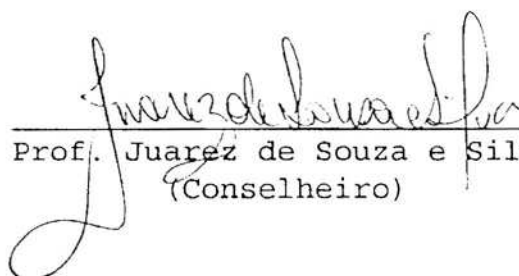
CDD. 19. ed. 551.5271

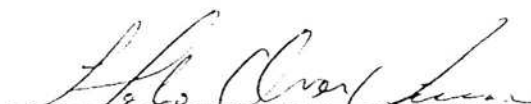
CLÁUDIA REGINA BARBOSA DA MATTA

DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DO GANHO ADICIONAL DE RADIAÇÃO SOLAR
DIRETA EM UMA SUPERFÍCIE HORIZONTAL PLANA PELO USO DE
REFLETORES SOLARES PLANOS

Tese Apresentada à
Universidade Federal de
Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de
Meteorologia Agrícola, para
Obtenção do Título de
"Magister Scientiae".

APROVADA: 22 de dezembro de 1994


Prof. Juarez de Souza e Silva
(Conselheiro)


Prof. Hélio Alves Vieira
(Conselheiro)


Prof. José Helvécio Martins


Prof. José Mário D. de Melo


Prof. Adil Rainier Alves
(Orientador)

Aos meus pais,
Ao Sérgio, meu marido,
À Luiza, minha filha.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por terem me dado todo o apoio e estímulo para o desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES, pelo apoio financeiro.

Aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, pelo convívio e pela ajuda.

Ao Professor Adil Rainier Alves, pela valiosa orientação e ajuda durante todo o curso e pela amizade e pelo apoio sempre demonstrados.

Ao Professor Hélio Alves Vieira, pelas idéias e sugestões.

Aos colegas do Curso de Agrometeorologia, pela convivência e amizade.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pela constante disposição e colaboração na execução deste trabalho.

Ao Sérgio, meu marido, pela constante ajuda, pela compreensão e pelo carinho em mais uma etapa cumprida de nossas vidas.

BIOGRAFIA

CLÁUDIA REGINA BARBOSA DA MATTA, filha de João Azevedo Barbosa e Jovercina Azevedo Barbosa, nasceu em Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais, no dia 9 de agosto de 1966.

Cursou o primeiro e o segundo graus em Belo Horizonte.

Em janeiro de 1991, graduou-se em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

Em abril de 1991, iniciou o Curso de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, em nível de Mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE SÍMBOLOS.....	viii
EXTRATO.....	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1. Refletores Solares Planos Utilizados em Conjunto. com Coletores Planos.....	5
3. METODOLOGIA.....	11
3.1. Ângulo de Inclinação do Refletor.....	11
3.2. Determinação do Ângulo de Incidência dos Raios Solares Diretos sobre o Refletor.....	15
3.3. Vetores Unitários que Caracterizam a Posição do Sol e o Plano da Superfície Refletora.....	16
3.4. Determinação das Componentes Ortogonais do Vetor Unitário Raio Refletido (\hat{u}_r).....	18
3.5. Cálculo dos Instantes Inicial e Final da Reflexão Solar na Direção da Superfície Horizontal.....	21

3.6. Cálculo da Irradiância Solar Total (Direta + Refletida) Sobre uma Superfície Horizontal Plana.....	22
3.6.1. Irradiância Solar Direta.....	22
3.6.1.1. Cálculo de τ_o	23
3.6.1.2. Cálculo de τ_r	24
3.6.1.3. Cálculo de α_w	25
3.6.1.4. Cálculo de τ_a	26
3.6.1.5. Cálculo da Irradiância Solar Direta em Uma Superfície Horizontal para Qualquer Dia do Ano.....	26
3.6.2. Irradiância Solar Refletida.....	27
3.6.2.1. Cálculo de α_r	29
3.7. Cálculo da Área de Intersecção entre os Raios Refletidos e a Superfície Horizontal.....	30
3.7.1. Determinação Geométrica do Ponto P2 de Intersecção entre o Plano Horizontal (PH) e o Raio Refletido Correspondente ao Raio Incidente no Vértice Superior Esquerdo do Refletor.....	30
3.7.2. Área Iluminada pelos Raios Refletidos.....	33
3.7.2.1. Caso 1 - ($y_2 \geq \overline{LC}$ e $x_2 \leq \overline{CC}$).....	34
3.7.2.2. Caso 2 - ($y_2 \leq \overline{LC}$ e $x_2 \geq \overline{CC}$) .	36
3.7.2.3. Caso 3 - ($y_2 < \overline{LC}$ e $x_2 < \overline{CC}$).....	38
3.7.2.4. Caso 4 - ($y_2 > \overline{LC}$ e $x_2 > \overline{CC}$).....	40
3.8. Determinação do Ganho Adicional de Energia Solar Direta na Superfície Horizontal.....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1. Inclinação do Refletor.....	43

4.2. Horário de "Nascer" do Sol para o Refletor (HNS) e Horário de Início da Reflexão (HIR) em Direção à Superfície Receptora.....	45
4.3. Área da Superfície Horizontal Receptora Iluminada pelos Raios Solares Refletidos.....	48
4.4. Ganho de Radiação Solar Direta.....	53
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	63
BIBLIOGRAFIA	66
APÊNDICES	69

LISTA DE SÍMBOLOS

a' - azimute do Sol, tomado a partir do Norte, positivo para o período da tarde e negativo para o período da manhã (graus).

A, B, C - variáveis utilizadas na determinação do ângulo de incidência dos raios solares sobre uma superfície horizontal, definidas de acordo com ALVES et alii (1982) (adimensional).

$A'B'C'$ - pontos dos vértices do triângulo formado pelo segmento de reta $\overline{B'C}$ contido na superfície receptora, com a mesma dimensão do seu comprimento; pelo segmento $\overline{A'B}$ contido no refletor, com a mesma dimensão da altura do refletor; e pelo segmento de reta $A'C'$ compreendido entre o ponto de incidência da radiação solar direta no topo do refletor e o ponto correspondente à reflexão desta radiação na superfície receptora, ao meio-dia solar.

A_2 - área do triângulo LMO, formado na superfície receptora, que não está recebendo radiação solar refletida quando $y_2 \leq \overline{LC}$ e $x_2 \geq \overline{CC}$ (m^2).

A_3 - área do triângulo $P_0O'L$ que não está recebendo radiação solar refletida quando $y_2 < \overline{LC}$ e $x_2 < \overline{CC}$ (m^2).

A_4 e A_5 - áreas do trapézio e do retângulo, respectivamente, obtidas pela intersecção dos pontos relativos aos raios refletidos com o plano da superfície horizontal quando $y_2 < \overline{LC}$ e $x_2 < \overline{CC}$ (m^2).

A_{int} - área da superfície horizontal receptora iluminada pelos raios solares refletidos (m^2).

B'' , b' - lados do trapézio formado na superfície receptora quando $y_2 \geq \overline{LC}$ e $x_2 \leq \overline{CC}$ (m).

\overline{CC} - comprimento da superfície receptora (m).

C_r - coeficiente de reflexão do refletor (adimensional).

$\left(\frac{\overline{D}}{D}\right)$ - fator de correção da distância Terra-Sol (adimensional).

D1 - variável utilizada na determinação dos instantes inicial e final de reflexão solar na direção da superfície horizontal (adimensional).

e_s - pressão de saturação do vapor d'água à temperatura do ar (hPa).

F - irradiância solar direta em uma superfície normal para os raios solares à distância média Terra-Sol ($J.m^{-2}.s^{-1}$).

GD - ganho adicional diário de radiação solar direta (J/m^2).

GH - ganho horário de radiação solar direta (J/m^2).

\overline{GI} - ganho adicional instantâneo calculado para o instante intermediário no intervalo de tempo Δt_i ($J.m^2.s^{-1}$).

h - ângulo horário do Sol (graus).

H - altitude local (m).

HNS - horário do "nascer" do Sol para o refletor (hora).

HIR - horário do início da reflexão dos raios solares em direção à superfície receptora.

I_d - irradiância solar direta em uma superfície horizontal plana no solo ($J.m^2.s^{-1}$).

I_{dr} - irradiância solar refletida em uma superfície horizontal plana no solo ($J.m^2.s^{-1}$).

I_{CS} - constante solar ($1.367 J.m^2.s^{-1}$).

ℓ - massa ótica absoluta de ozônio na direção vertical (cm CNTP).

\overline{LC} - largura da superfície receptora (m).

\overline{LR} - largura do refletor (m).

LM - lado do triângulo LMO, formado na superfície receptora, cuja área não está recebendo radiação solar refletida quando $y_2 \leq \overline{LC}$ e $x_2 \geq \overline{CC}$ (m).

m_a - massa ótica relativa para as condições atmosféricas reinantes (adimensional).

MO - lado do triângulo LMO, formado na superfície receptora, cuja área não está recebendo radiação solar refletida quando $y_2 \leq \overline{LC}$ e $x_2 \geq \overline{CC}$ (m).

m_r - massa ótica relativa para as condições de atmosfera padrão (adimensional).

M_1, M_2, M_3 e M_4 = variáveis utilizadas na determinação dos instantes inicial e final de reflexão solar na direção da superfície horizontal (adimensional).

n - número do dia do ano, variando de 1 a 365, para o período de 1º de janeiro a 31 de dezembro (adimensional).

n_i - número de intervalos de tempo considerados para o cálculo de GD (adimensional).

o' - origem do sistema de coordenadas cartesianas.

P - pressão local (hPa).

P_0 - ponto situado na extremidade inferior esquerda do refletor.

P_1 - ponto correspondente ao vértice superior esquerdo do refletor.

P_2 - ponto de intersecção entre o plano horizontal e o raio refletido correspondente ao raio incidente no vértice superior esquerdo do refletor.

Q - ponto situado na extremidade inferior do refletor com a mesma coordenada y_2 do ponto P_2 .

R - altura do refletor (m).

R_{\max} - altura máxima indicada para o refletor (m).

R_{\min} - altura mínima permitida para o refletor (m).

r_1, r_2 e r_3 - componentes ortogonais do vetor Raio Refletido nas direções \vec{i}, \vec{j} e \vec{k} , respectivamente (adimensional).

T - temperatura do ar ambiente (K).

t - escalar relacionado ao vetor \hat{u}_r (adimensional).

U_1 - massa ótica absoluta de vapor d'água em dada direção, corrigida pelo efeito da pressão e da superfície (cm).

\hat{u}_n - vetor unitário normal à superfície do refletor (adimensional).

\hat{u}_{n1} - vetor unitário normal à superfície receptora (adimensional).

\hat{u}_r - vetor unitário na direção e no sentido do raio refletido (adimensional).

\hat{u}_s - vetor unitário que caracteriza a posição do Sol (adimensional).

UR - umidade relativa do ar (%)

U_3 - massa ótica absoluta de ozônio (cm CNTP).

V_i - visibilidade atmosférica (km).

X - variável utilizada no cálculo do fator de correção da distância média Terra-Sol (Radianos).

x' - ângulo formado entre o refletor e o vetor normal à superfície receptora (graus).

x_2, y_2 e z_2 - coordenadas do ponto P_2 (m).

W - água precipitável na atmosfera (cm).

Z - ângulo zenital do Sol (graus).

Z_{12} - ângulo zenital do Sol ao meio-dia solar (graus).

α - azimute da superfície inclinada, tomado em relação ao Sul, variando de 0° a $\pm 180^\circ$, positivo a Oeste e negativo a Leste (graus).

α_0 - fração da energia solar incidente no topo da atmosfera, que é absorvida pelo ozônio (adimensional).

α_r - ângulo formado entre o vetor normal à superfície receptora e os raios refletidos (graus).

α_w - fração da energia incidente absorvida pelo vapor d'água (adimensional).

β - ângulo de inclinação do refletor, tomado entre a face posterior do refletor e o plano horizontal (graus).

Δ_{ti} - intervalo de tempo considerado para o cálculo de GD (s).

δ - declinação do Sol (graus).

γ - ângulo formado pelo vetor $\vec{OP_2}$ e a extremidade inferior do refletor (graus).

φ - latitude local (graus).

θ - ângulo de incidência dos raios solares diretos sobre uma superfície inclinada (graus).

τ_a - transmitância atmosférica considerando apenas os aerossóis como agente de atenuação da radiação solar (adimensional).

τ_0 - transmitância atmosférica considerando apenas o ozônio como agente de atenuação da radiação solar (adimensional).

τ_r - transmitância atmosférica considerando apenas a atenuação associada ao espalhamento de "Rayleigh" (adimensional).

EXTRATO

MATTA, Cláudia Regina Barbosa da, M.S., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 1994. Determinação analítica do ganho adicional de radiação solar direta em uma superfície horizontal plana pelo uso de refletores solares planos. Professor Orientador: Adil Rainier Alves. Professores Conselheiros: Juarez de Souza e Silva e Hélio Alves Vieira.

Em um sistema onde utilizam-se refletores e coletores solares combinados, é de fundamental importância o conhecimento dos efeitos causados pelo refletor solar no desempenho do sistema. A contribuição do refletor é determinada mediante o conhecimento da irradiância solar direta na superfície em questão, do ângulo formado entre o feixe de radiação e o vetor normal unitário à superfície receptora, do coeficiente de reflexão do refletor e da área formada pela intersecção dos raios refletidos com o plano da superfície receptora.

Considerando os aspectos astronômicos, geográficos e geométricos, relativos ao refletor e à superfície horizontal, foram definidos vetores unitários representando

a posição do Sol num dado instante e unitários normais às superfícies em questão. Desenvolveram-se equações que permitiram determinar analiticamente a área da superfície receptora iluminada pelos raios solares refletidos, assim como o ângulo de incidência desses raios na mesma superfície. Com base em tais equações, desenvolveu-se um método analítico para determinar o ganho adicional de energia solar na forma de radiação direta em superfícies horizontais, alinhadas no sentido leste-oeste, pelo uso de refletores planos. Este método permitiu analisar a eficiência do refletor solar para diferentes latitudes e épocas do ano.

1. INTRODUÇÃO

O custo dos combustíveis fósseis e o impacto ambiental causado por sua queima, têm levado alguns pesquisadores a retomarem estudos relacionados a outras formas de energia que estavam praticamente paralisados desde o início da "crise do petróleo" de 1973. A dependência do homem em relação aos combustíveis fósseis é ainda hoje uma realidade. Verifica-se atualmente que 85% do consumo energético mundial provém desses combustíveis e 40% de toda a energia consumida no mundo é oriunda do petróleo (NICKLAS, 1993). Segundo este autor, projeções feitas para o período de 1985 a 2020 estimam um crescimento na demanda de energia de 1,7% ao ano, o que representa um aumento de 5,8 bilhões de toneladas de petróleo nesse período.

São preocupantes, nos dias de hoje, o fato de as reservas energéticas serem limitadas e, também, a questão da poluição ambiental causada pela queima dos combustíveis em geral. Aproximadamente, 30 bilhões de toneladas de CO₂,

CO, SO₂ e NO_x, acompanhados de fuligens e cinzas, são lançadas anualmente na atmosfera, provenientes da queima de combustível nos meios de transporte, na geração de eletricidade e na geração de calor, dentre outros (SERPONE et alii, 1992).

A distribuição irregular das reservas de petróleo no Planeta e a demanda crescente de energia, principalmente nos países mais industrializados, provocam constantes conflitos entre os países fornecedores e os países consumidores. Uma maneira de minimizar tais conflitos é o aproveitamento de formas alternativas de energia. Fontes não-convencionais de energia como a energia solar, embora não possuam os atributos energéticos dos combustíveis fósseis, destacam-se por apresentar-se ambientalmente compatíveis, uma vez que o equilíbrio térmico da Terra não é perturbado, contrariamente ao que acontece com o uso das energias fóssil ou nuclear. Outro fator a considerar é que o suprimento dessa fonte de energia é praticamente ilimitado.

A quantidade de radiação solar que chega à superfície da Terra varia ao longo do ano, em razão dos efeitos astronômicos e dos processos de atenuação da radiação pela atmosfera, como o espalhamento e a absorção (VIANELLO e ALVES, 1991). Mesmo assim, é grande a quantidade de energia solar que atinge a superfície da Terra, embora sua utilização direta para obtenção de elevadas potências seja quase impraticável, em razão da baixa densidade de seu fluxo energético. Para utilização de

energia solar em operações que envolvam temperaturas superiores a 100°C, torna-se necessária sua concentração por meio da reflexão dos raios solares para os receptores, aumentando, assim, a irradiância, ou seja, a densidade do fluxo radiante incidente (ALMANZA et alii, 1992).

Muitos pesquisadores têm-se dedicado ao estudo dos efeitos dos refletores solares sobre o rendimento dos coletores solares (SEITEL, 1975; GRASSIE e SHERIDAN, 1977; WIJEYSUNDERA, 1978; GARG e HRISHIKESAN, 1988). Vários tipos de coletores solares já foram projetados, objetivando-se obter energia não-poluente a um baixo custo. No Brasil, os coletores solares convencionais ainda apresentam custos muito elevados. O interesse pelo uso da energia solar tem crescido muito entre os países do Terceiro Mundo. Em 1990, estes países foram responsáveis pela compra da maioria dos equipamentos de energia solar das companhias americanas, o que representou um aumento de 30% nas vendas em relação aos dois anos anteriores (CHARLES, 1991).

Um coletor solar plano, de baixo custo e que vem despertando a atenção de pesquisadores, é o do tipo SSP (*shallow solar pond*). O SSP é um tipo de coletor solar que apresenta potencial para utilização em indústrias a custos competitivos com os dos combustíveis fósseis (CASAMAJOR e PARSONS, 1979). Por ser um tipo de coletor plano que não permite inclinação, torna-se evidente que o uso de refletores poderá contribuir significativamente para aumentar a eficiência do SSP, especialmente nos meses mais

frios do ano, quando a trajetória aparente do Sol é mais inclinada em relação ao plano horizontal.

Considerando que um coletor convencional apresenta construção e manutenção relativamente mais caras que a construção e manutenção de um refletor, reduções substanciais dos custos podem ser esperadas quando se utiliza o sistema combinado coletor-refletor (SEITEL, 1975).

Diante do exposto, o presente trabalho objetivou desenvolver um método analítico para determinação dos instantes inicial e final de reflexão dos raios solares na direção da superfície receptora, bem como para determinação do ganho adicional de energia solar na forma de radiação direta em superfícies horizontais pelo uso de refletores planos, para quaisquer latitudes e épocas do ano.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Refletores Solares Planos Utilizados em Conjunto com Coletores Planos

O aumento da incidência de radiação solar em coletores, por meio de refletores solares, é de grande importância, considerando-se o elevado potencial de aplicações da energia solar com o envolvimento de altas temperaturas. A componente direta da radiação é que permite esse aumento, levando-se em conta que a componente difusa não é alterada significativamente pela adição de refletores (CHIAM, 1981).

Quando um feixe de radiação atinge uma superfície, dois tipos de reflexão podem ser observados, ou seja, quando o ângulo de incidência é igual ao de reflexão, a reflexão é dita especular; por outro lado, quando o feixe incidente é distribuído uniformemente em todas as direções após a reflexão, esta é dita difusa (HOLMAN, 1983). Dessa

forma, os refletores podem ser classificados em especulares e difusos.

Refletores difusos proporcionam aumentos muito pequenos no fluxo de radiação incidente no coletor, tendo, portanto, sua utilização desaconselhável (GRASSIE e SHERIDAN, 1977). Assim, para aumentar a incidência de radiação solar em coletores, são utilizados os refletores especulares.

Algumas características de espelhos refletores são desejáveis quando se pretende obter um melhor aproveitamento da radiação solar, por exemplo: reflectância maior que 85%, tempo de vida útil maior que 10 anos, resistência à radiação ultravioleta, resistência a poluentes etc., observando-se, evidentemente, os custos inicial e de manutenção (ALMANZA et alii, 1992).

No Brasil, são grandes as dificuldades, em nível industrial, para obtenção de superfícies refletoras de vida útil razoável a preços acessíveis e com boa refletividade (TORRES, 1980). Materiais como o alumínio e o aço inoxidável são muito utilizados (PASSOS, 1981).

Alguns estudos já foram conduzidos com o intuito de modelar o aumento da radiação incidente em coletores solares utilizados em conjunto com um ou mais refletores. TABOR (1966), utilizando dados observados de radiação, verificou aumento da eficiência de um coletor plano quando usou refletores especulares, para os dias de equinócio e de solstício. Esse estudo, porém, não permitiu definir

previamente o aumento real de energia solar incidente no coletor utilizado em conjunto com refletores.

Um modelo utilizado para estudar o efeito de refletores sobre coletores planos foi apresentado por McDANIELS (1975), cujos resultados foram mostrados para diferentes valores dos ângulos de inclinação do refletor e do coletor. Nesse estudo, o aumento do fluxo solar incidente no coletor foi obtido por meio da comparação entre a energia coletada pelo conjunto coletor-refletor e a coletada por um coletor fixo, e nenhuma consideração foi feita acerca do cálculo da área do coletor iluminada pelos raios refletidos. Considerou-se apenas o comprimento efetivo do coletor, ou seja, aquele definido pela reflexão dos raios incidentes em um ponto qualquer do topo do refletor. Dessa forma, utilizou-se, para qualquer horário, a mesma forma geométrica da área interceptada pelos raios refletidos. O desempenho do sistema foi estudado apenas instantaneamente, estabelecendo-se, então, um aumento de energia coletada para dado instante. Na seqüência desse estudo, BAKER et alii (1978) estenderam as análises, a fim de obter a melhor combinação geométrica para o sistema que proporcionasse o maior aproveitamento diário da energia solar. Para tanto, foi feita a avaliação de seu desempenho, estabelecendo-se um fator médio correspondente ao aumento diário da irradiância solar direta em função do uso de refletores. Para o cálculo desse aumento, considerou-se o tempo correspondente à duração do dia, não levando em conta, então, a diferença que poderia existir em

determinadas situações, no intervalo de tempo compreendido entre os instantes inicial e final de reflexão e a duração do dia.

GRASSIE e SHERIDAN (1977) elaboraram um modelo que simulava o desempenho anual de um sistema de aquecimento de água, apresentando resultados coerentes com aqueles obtidos experimentalmente. Apesar de o aumento da eficiência do coletor ter sido estimado, quando utilizado em conjunto com refletores, a metodologia apresentada não permitiu, de forma objetiva, calcular a área do coletor exposta à radiação refletida, já que a análise vetorial não definiu a origem do sistema de eixos cartesianos.

WIJEYSUNDERA (1978) propôs uma equação geral, obtida a partir de transformações matriciais, para o cálculo de um fator geométrico que relaciona sua área iluminada pelos raios refletidos com a área total do coletor. Porém, verificou-se que não foram feitas considerações a respeito das situações em que as larguras do coletor e do refletor eram diferentes.

De maneira similar, TAHA e ELDIGHIDY (1980) desenvolveram equações que permitiam calcular a fração da área do coletor exposta à radiação refletida, considerando, também, a largura do coletor igual à do refletor. O desempenho do sistema foi analisado em função da área do coletor e do refletor, de sua inclinação e do azimute do sistema. Assim, concluiu-se que as combinações de coletores e refletores planos que proporcionam os maiores ganhos de

radiação foram aquelas em que o sistema se encontrava alinhado na direção leste-oeste.

CHIAM (1981) desenvolveu um estudo um pouco mais detalhado acerca dos sistemas combinados refletor-coletor solar, analisando-os individualmente com refletores posicionados abaixo ou acima do coletor. Esse trabalho objetivou ilustrar, de forma geral, a melhor combinação geométrica do sistema, a fim de produzir o aumento desejado da irradiância solar direta. Tal incremento foi obtido em função do coeficiente de reflexão do refletor e da razão entre a área obtida pela projeção dos raios refletidos no coletor e a sua área total. Os principais parâmetros considerados neste estudo foram a largura do refletor em relação à do coletor e os ângulos de inclinação de ambos.

CHIAM (1982) analisou também diferentes posições e ângulos do refletor, mantendo, porém, a inclinação do coletor igual à latitude local (38°S). Dessa forma, concluiu que, para um coletor com essa inclinação, o refletor deve estar posicionado acima do coletor. Essa composição geométrica, apesar de produzir grande aumento no fluxo de radiação no inverno, permite um aumento ainda maior no verão. Contudo, tal combinação foi considerada apropriada para sistemas de aquecimento solar de água. Para o caso de o refletor estar posicionado abaixo do coletor, verificou-se ainda, nesse trabalho, que o aumento no fluxo de radiação no inverno foi maior que no verão.

Estudos mais complexos de sistemas coletor-refletor, utilizando-se dois refletores, foram

desenvolvidos por GARG e HRISHIKESAN (1988), que consideraram também a largura do refletor igual à do coletor. Simulações numéricas usando esse modelo e um outro, proposto por TAHA e ELDIGHIDY (1980), mostraram diferenças nos resultados relativos à energia total absorvida pelo coletor. Os resultados obtidos com o uso do modelo de GARG e HRISHIKESAN (1988) mostraram-se satisfatórios, principalmente no inverno, período em que os refletores mais contribuíram para o incremento da radiação absorvida. Resultados semelhantes também foram verificados por CLARK e DICKINSON (1980), que utilizaram refletores solares em conjunto com coletores do tipo SSP, observando um aumento da irradiância solar no coletor de até 100%, em dias ensolarados de inverno.

Uma melhor contribuição dos refletores planos também pode ser verificada quando maior for o ângulo zenital do Sol ao meio-dia solar (GARG e HRISHIKESAN, 1988).

Observou-se que em nenhum dos trabalhos mencionados foram feitas considerações acerca do período diário em que há contribuição real do refletor, ou seja, aquele definido pelos instantes inicial e final de reflexão dos raios solares incidentes no refletor, correspondentes aos raios refletidos que efetivamente atingem a superfície do coletor.

3. METODOLOGIA

3.1. Ângulo de Inclinação do Refletor

Por razões operacionais e econômicas, optou-se pelo desenvolvimento de um modelo em que se consideram o refletor fixo e o sistema refletor-superfície horizontal alinhado no sentido leste-oeste. Por ser o meio-dia solar o horário em que se obtêm, normalmente, os mais elevados valores de irradiância solar direta, a inclinação ótima do refletor para esse horário foi determinada e considerada constante para todo o dia.

A melhor inclinação do refletor é aquela cuja reflexão dos raios solares incidentes no topo do refletor, ao meio-dia solar, corresponde a raios refletidos, atingindo a extremidade oposta da superfície horizontal coletora (Figura 1), de forma que toda a superfície coletora seja iluminada pelos raios refletidos.

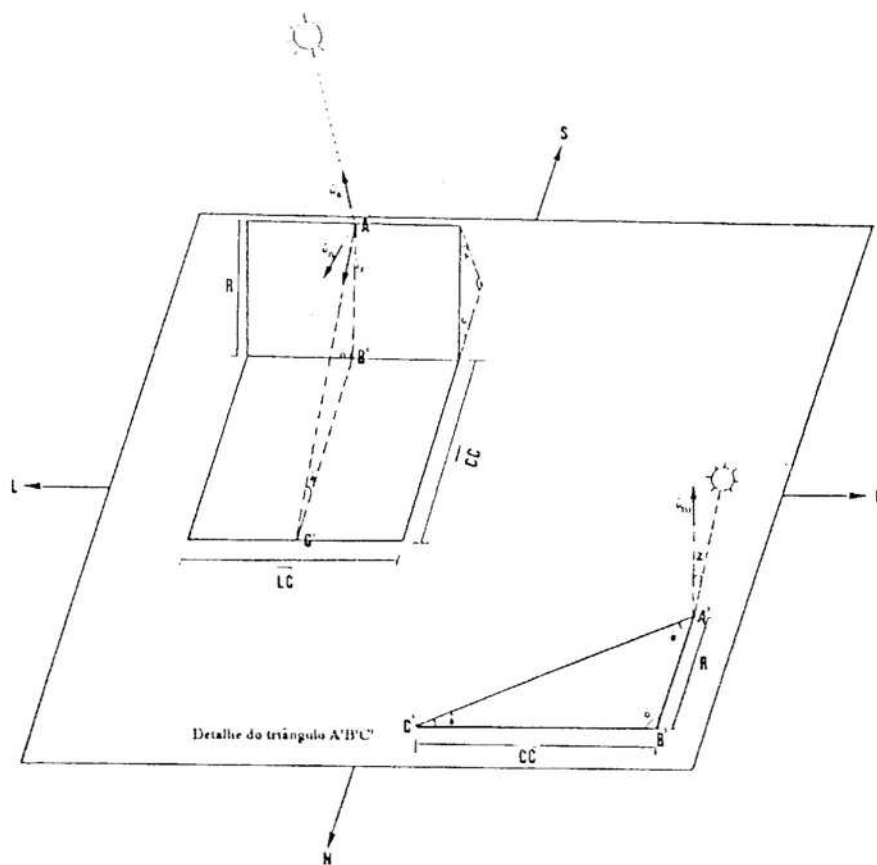


FIGURA 1 - Sistema Refletor-Superfície Horizontal Receptora, Alinhado no Sentido Leste-Oeste, para o Horário do Meio-Dia Solar.

Identifica-se, na Figura 1, o triângulo A'B'C' formado pelo segmento de reta $\overline{B'C}$ contido na superfície receptora, com a mesma dimensão de seu comprimento; pelo segmento $\overline{A'B}$ contido no refletor, com a mesma dimensão da altura do refletor; e pelo segmento da reta A'C', compreendido entre o ponto de incidência da radiação solar direta no topo do refletor e o ponto correspondente à reflexão desta radiação na superfície receptora, ao meio-dia solar. Os ângulos internos desse triângulo foram assim definidos:

$$\hat{\alpha} = 90^\circ - 2x' - Z_{12}; \quad (1)$$

$$\hat{\omega} = 90^\circ + x'; \quad (2)$$

$$\hat{\epsilon} = x' + Z_{12}, \quad (3)$$

em que

x' = inclinação do refletor em relação à vertical (graus);

e

Z_{12} = ângulo zenital do Sol ao meio-dia solar (graus).

O ângulo zenital do Sol ao meio-dia solar pode ser assim calculado:

$$Z_{12} = |\varphi - \delta|, \quad (4)$$

em que

φ = latitude do local, variando de 0° a $\pm 90^\circ$, positiva no Hemisfério Norte e negativa no Hemisfério Sul;

δ = declinação do Sol, variando de 0° a $\pm 23^\circ 27'$, positiva quando o Sol se encontra no Hemisfério Norte Celeste e negativa quando se encontra no Hemisfério Sul Celeste.

A declinação do Sol foi determinada de acordo com a equação de Cooper, isto é:

$$\delta = 23,45^\circ \text{ sen } [(284 + n)360^\circ / 365], \quad (5)$$

sendo n o número do dia do ano (dia juliano), variando de 1 a 365, para o período de 1º de janeiro a 31 de dezembro.

Aplicando a lei dos senos ao triângulo A'B'C', identificado na Figura 1, obtém-se a seguinte relação:

$$\frac{\text{sen } (x' + Z_{12})}{\text{sen } (90^\circ - 2x' - Z_{12})} = \frac{\overline{CC}}{R}, \quad (6)$$

sendo

\overline{CC} = comprimento da superfície horizontal (m); e

R = altura do refletor (m).

Resolvendo, então, a Equação 6, determina-se a inclinação ótima, x' , do refletor. Assim, o ângulo β , formado entre o refletor e a superfície horizontal, é dado diretamente como

$$\beta = 90^\circ - x' \quad (7)$$

3.2. Determinação do Ângulo de Incidência dos Raios Solares Diretos sobre o Refletor

De acordo com ALVES et alii (1982), o ângulo de incidência (θ) dos raios solares diretos sobre uma superfície inclinada, isto é, o ângulo formado entre esses raios e a normal à superfície, pode ser determinado pela seguinte equação:

$$\cos \theta = A \cosh + B \senh + C, \quad (8)$$

sendo

$$A = \cos\varphi \cos\delta \cos\beta + \sen\beta \cos\alpha \cos\delta \sen\varphi; \quad (9)$$

$$B = \sen\beta \cos\delta \sen\alpha; \quad (10)$$

$$C = \sen\varphi \sen\delta \cos\beta - \sen\beta \cos\alpha \sen\delta \cos\varphi, \quad (11)$$

em que

φ = latitude local;

δ = declinação do Sol;

β = ângulo de inclinação da superfície inclinada, em relação à horizontal, de 0° a 90° ;

α = azimute da superfície inclinada, tomado em relação ao sul, variando de 0° a $\pm 180^\circ$, positivo a oeste e negativo a leste;

h = ângulo horário do Sol, definido como sendo o ângulo entre o plano meridiano do local e o plano meridiano celeste que contém o Sol. Esse ângulo apresenta uma variação aproximada de 15° por hora, sendo igual a zero ao

meio-dia solar, negativo no período da manhã e positivo à tarde.

3.3. Vetores Unitários que Caracterizam a Posição do Sol e o Plano da Superfície Refletora

Os vetores unitários que caracterizam a posição do Sol (\hat{u}_s) e a superfície inclinada refletora (\hat{u}_n), como ilustrado na Figura 2, foram definidos em função do azimute do Sol (a'), do ângulo zenital do Sol (Z) e da inclinação (β) do refletor em relação ao plano horizontal.

A convenção adotada para os sentidos positivos dos vetores unitários, \vec{i} , \vec{j} , \vec{k} , está indicada na Figura 2. Dessa forma, obtêm-se o vetor unitário na posição do Sol (\hat{u}_s) e o vetor unitário normal à superfície refletora (\hat{u}_n), fazendo

$$\hat{u}_s = (\text{sen}Z \text{cos}a') \vec{i} - (\text{sen}Z \text{sen}a') \vec{j} + (\text{cos}Z) \vec{k}; e \quad (12)$$

$$\hat{u}_n = (\text{sen}\beta) \vec{i} + (\text{cos}\beta) \vec{k}. \quad (13)$$

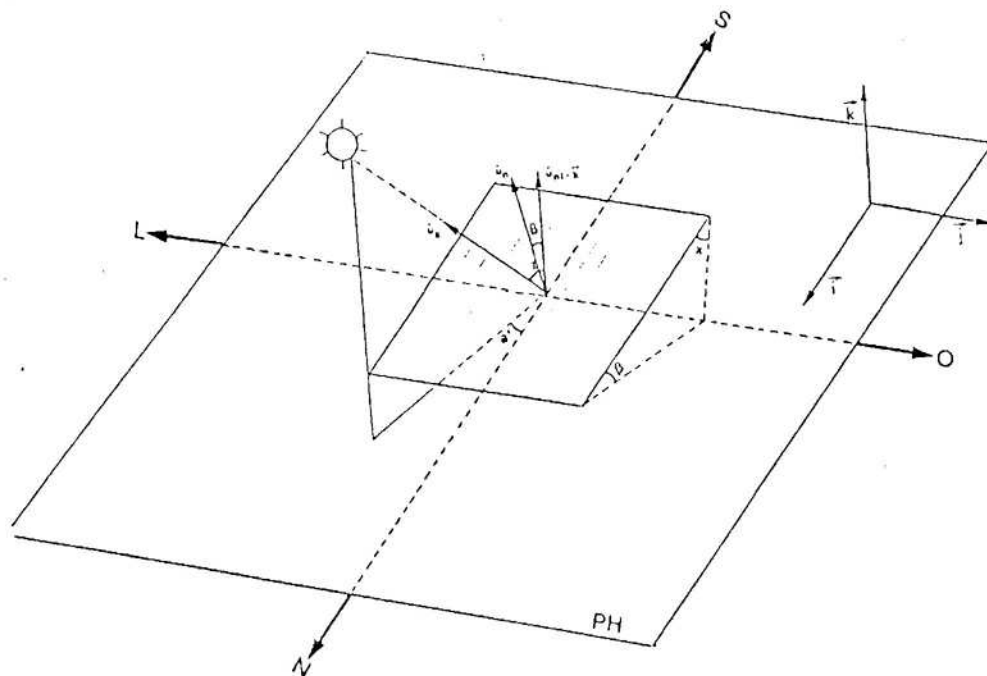


FIGURA 2 - Vetores Unitários que Caracterizam a Posição do Sol (\hat{u}_s), a Superfície Inclinada Refletora (\hat{u}_n) e o Plano Horizontal ($\hat{u}_{n1} = \vec{k}$) em Função do Azimute do Sol (α'), do Ângulo Zenital do Sol (Z) e da Inclinação (β) do Refletor em Relação ao Plano Horizontal.

O azimute do Sol (a'), considerado em relação ao Norte, variando de 0° a $\pm 180^\circ$, positivo no período da tarde e negativo no período da manhã, foi obtido como

$$\text{sena}' = -\text{sena}; \quad (14)$$

$$\text{cosa}' = -\text{cosa}, \quad (15)$$

em que

$$\text{sena} = \frac{\cos\delta \operatorname{senh}}{\operatorname{senZ}}; \quad \text{e} \quad (16)$$

$$\text{cosa} = \frac{\operatorname{sen}\varphi \cos Z - \operatorname{sen}\delta}{\operatorname{senZ} \cos\delta}, \quad (17)$$

sendo " a " o azimute do Sol tomado em relação ao Sul, variando de 0° a $\pm 180^\circ$, negativo no período da manhã e positivo à tarde.

Convencionou-se β positivo para o refletor voltado para o Norte e negativo para o voltado para o Sul.

3.4. Determinação das Componentes Ortogonais do Vetor Unitário Raio Refletido (\hat{u}_r)

De acordo com as leis da reflexão especular, são coplanares os vetores \hat{u}_s , \hat{u}_n e \hat{u}_r , sendo o último um vetor unitário que define a orientação espacial do raio

refletido. Dessa forma, verificou-se a seguinte operação vetorial:

$$\hat{u}_S \times \hat{u}_N = \hat{u}_N \times \hat{u}_R, \quad (18)$$

em que

$$\hat{u}_R = r_1 \vec{i} + r_2 \vec{j} + r_3 \vec{k}, \quad (19)$$

sendo

r_1 , r_2 e r_3 as componentes escalares do vetor \hat{u}_R .

Desenvolvendo a Equação 18, tem-se

$$\begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \text{sen}Z \cdot \text{cosa}' & (-\text{sen}Z \cdot \text{sena}') & \text{cos}Z \\ \text{sen}\beta & 0 & \text{cos}\beta \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \text{sen}\beta & 0 & \text{cos}\beta \\ r_1 & r_2 & r_3 \end{vmatrix},$$

ou seja:

$$(-\text{sen}Z \cdot \text{sena}' \cdot \text{cos}\beta) \vec{i} + (\text{cos}Z \cdot \text{sen}\beta - \text{cos}\beta \cdot \text{sen}Z \cdot \text{cosa}') \vec{j} + (\text{sen}\beta \cdot \text{sen}Z \cdot \text{sena}') \vec{k} = (-r_2 \cdot \text{cos}\beta) \vec{i} + (r_1 \cdot \text{cos}\beta - r_3 \cdot \text{sen}\beta) \vec{j} + (r_2 \cdot \text{sen}\beta) \vec{k}. \quad (20)$$

Assim, de acordo com a Equação 20, obtém-se diretamente as seguintes relações:

$$r_1 = \text{tg}\beta \cdot \text{cos}Z - \text{sen}Z \cdot \text{cosa}' + r_3 \cdot \text{tg}\beta; \text{ e} \quad (21)$$

$$r_2 = \text{sen} z \cdot \text{sen} a'. \quad (22)$$

Observou-se que as relações obtidas pelo produto vetorial entre os vetores analisados permitem identificar apenas a componente r_2 do vetor unitário \hat{u}_r . Assim, torna-se necessário utilizar o produto interno entre os vetores unitários \hat{u}_n e \hat{u}_r , a fim de obter outras relações que permitam identificar as componentes r_1 e r_3 . Como se sabe, o produto interno é dado como

$$\hat{u}_n \cdot \hat{u}_r = \cos\theta |\hat{u}_n| \cdot |\hat{u}_r|, \quad (23)$$

sendo θ o ângulo entre os vetores unitários \hat{u}_n e \hat{u}_r e $|\hat{u}_n| = |\hat{u}_r| = 1$.

Combinando as Equações 13, 19 e 23, obtém-se a seguinte relação:

$$r_1 \operatorname{sen}\beta + r_3 \operatorname{cos}\beta = \cos\theta, \quad (24)$$

que forma com a Equação 21 um sistema de duas equações e duas incógnitas, r_1 e r_3 , que tem como solução

$$r_3 = \operatorname{sen}\beta \operatorname{cos}\beta \operatorname{sen}Z \operatorname{cosec}a' + \operatorname{cos}\beta \operatorname{cos}\theta - \operatorname{sen}^2\beta \operatorname{cos}Z \quad (25)$$

e

$$r_1 = (\operatorname{cos}\theta / \operatorname{sen}\beta) - (\operatorname{cos}^2\beta \operatorname{sen}Z \operatorname{cosec}a') - (\operatorname{cos}^2\beta \operatorname{cos}\theta / \operatorname{sen}\beta) + (\operatorname{cos}\theta \operatorname{sen}\beta \operatorname{cos}Z) \quad (26)$$

ou, então,

$$r_1 = (\operatorname{cos}\theta - r_3 \operatorname{cos}\beta) / \operatorname{sen}\beta. \quad (27)$$

3.5. Cálculo dos Instantes Inicial e Final da Reflexão Solar na Direção da Superfície Horizontal

O instante inicial da reflexão solar, para que os raios refletidos interceptassem a superfície horizontal, será determinado em função da componente r_3 do vetor \hat{u}_r .

Calcula-se, inicialmente, o valor de r_3 no instante em que o Sol está "nascendo" para o refletor. Se nesse instante os raios solares já refletirem em direção à superfície horizontal, ou seja, se o valor da componente r_3 for negativo, esse horário será também o de início da reflexão. O final da reflexão ocorrerá no horário simétrico ao do instante inicial (mesmo ângulo horário, em módulo, mas com sinais opostos).

Caso r_3 seja positivo no horário em que o Sol "nasce" para o refletor, deve-se, então, determinar o instante em que r_3 se anula. Nesse caso, sendo $r_3 = 0$, tem-se

$$\cosh = (M1 - M2 + M3 - M4) / D1, \quad (28)$$

em que

$$M1 = (\text{sen}\beta \cos\beta \text{sen}^2\varphi \text{sen}\delta) / \cos\varphi; \quad (29)$$

$$M2 = (\cos^2\beta \text{sen}\delta) / \cos\varphi; \quad (30)$$

$$M3 = \text{sen}\varphi \text{sen}\delta \text{sen}^2\beta; \quad (31)$$

$$M4 = C \cos\beta; e \quad (32)$$

$$D1 = -\text{sen}\beta \cos\beta \text{sen}\varphi \cos\delta + \cos\delta \cos\varphi \text{sen}^2\beta + A \cos\beta, \quad (33)$$

sendo A e C as variáveis definidas por ALVES et alii (1982), Equação 8. Assim, o ângulo horário obtido pela solução da Equação 28 define o horário em que se inicia a reflexão dos raios solares na direção da superfície horizontal. O instante final de reflexão é definido como descrito anteriormente, isto é, como o horário simétrico ao de início da reflexão.

3.6.Cálculo da Irradiância Solar Total (Direta + Refletida) Sobre uma Superfície Horizontal Plana.

3.6.1. Irradiância Solar Direta

A irradiância solar direta em uma superfície normal aos raios solares foi obtida, usando-se o modelo **A** proposto por IQBAL (1983), como descrito a seguir:

$$F = I_{CS} (\tau_o \tau_r - \alpha_w) \tau_a, \quad (34)$$

em que

F = irradiância solar direta em uma superfície normal aos raios solares a uma distância média Terra-Sol ($J.m^{-2}.s^{-1}$);

τ_o = transmitância atmosférica, considerando-se apenas o ozônio como agente de atenuação da radiação solar;

τ_r = transmitância atmosférica, considerando-se apenas a atenuação associada ao espalhamento de "Rayleigh" (moléculas de ar seco);

τ_a = transmitância atmosférica, considerando-se apenas os aerossóis como agente de atenuação da radiação solar;

α_w = fração da energia incidente absorvida pelo vapor d'água; e

I_{CS} = constante solar ($1.367 \text{ J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$).

3.6.1.1. Cálculo de τ_o

A transmitância atmosférica, considerando-se apenas o ozônio como agente de atenuação, foi assim obtida:

$$\tau_o = 1 - \alpha_o, \quad (35)$$

em que α_o representa a fração da energia solar incidente no topo da atmosfera, que é absorvida pelo ozônio, estimada como segue:

$$\alpha_o = \frac{0,02118U_3}{1+0,042U_3+3,23 \times 10^{-4}U_3^2} + \frac{1,082U_3}{1+138,6U_3}^{0,805} + \frac{0,0658U_3}{1+(103,6U_3)}, \quad (36)$$

em que

U_3 = massa ótica absoluta de ozônio (cm CNTP), dada por

$$U_3 = \ell m_r \quad (37)$$

em que

ℓ = massa ótica absoluta de ozônio na direção vertical (cm CNTP); e

m_r = massa ótica relativa para as condições de atmosfera padrão, calculada como

$$m_r = [\cos Z + 0,15(93,885 - Z)^{-1,253}]^{-1}, \quad (38)$$

sendo Z o ângulo zenital do Sol (em graus).

3.6.1.2. Cálculo de τ_r

A transmitância atmosférica τ_r associada às moléculas de ar seco foi calculada como

$$\tau_r = 0,972 - 0,08262m_a + 0,00933m_a^2 - 0,00095m_a^3 + 0,000437m_a^4, \quad (39)$$

em que

m_a = massa ótica relativa para as condições atmosféricas reinantes, dada como

$$m_a = m_r(P/1.013,25), \quad (40)$$

sendo P a pressão atmosférica local, em hPa, que pode ser estimada como

$$P = 1.013,25 \exp(-0,0001184 H), \quad (41)$$

sendo H a altitude local, em metros.

3.6.1.3. Cálculo de α_w

A fração de energia solar incidente, absorvida pelo vapor d'água, foi calculada como

$$\alpha_w = \frac{2,9 U_1}{(1 + 141,5 U_1)^{0,635} + 5,925 U_1}, \quad (42)$$

em que

U_1 = massa ótica absoluta de vapor d'água (em cm) em dada direção, corrigida pelo efeito da pressão e da temperatura, dada como

$$U_1 = W m_r, \quad (43)$$

sendo W a quantidade de água precipitável na atmosfera (em cm), calculada, neste trabalho, de acordo com a equação formulada por Leckner (1978), citado por IQBAL (1983), isto é:

$$W = 4,93 \times 10^{-3} UR e_s/T, \quad (44)$$

em que

UR = umidade relativa do ar (%);

T = temperatura do ar (K); e

e_s = pressão de saturação do vapor d'água à temperatura T, calculada pela seguinte equação:

$$e_s = \exp(26,23 - 5.416/T). \quad (45)$$

3.6.1.4. Cálculo de τ_a

A transmitância atmosférica τ_a , associada aos aerossóis, foi estimada como

$$\tau_a = \left\{ [0,97 - 1,265(V_i) - 0,66]^{m_a} \right\}^{0,9}, \quad (46)$$

em que

V_i = visibilidade atmosférica (km).

3.6.1.5. Cálculo da Irradiância Solar Direta em Uma Superfície Horizontal para Qualquer Dia do Ano

A irradiância solar direta em uma superfície horizontal em nível do solo, I_d , num dado dia do ano e num dado instante, foi determinada de acordo com a equação

$$I_d = F (\bar{D}/D)^2 \cos Z, \quad (47)$$

sendo F a irradiância solar direta obtida pela Equação 34; $\bar{D}/D)^2$ é um fator de correção da distância da Terra ao Sol, obtido com a expressão de Spencer (1971), apresentada por VIANELLO e ALVES (1991), isto é:

$$\begin{aligned} (\bar{D}/D)^2 = & 1,000110 + 0,034221 \cos X + 0,001280 \sin X + \\ & 0,000719 \cos 2X + 0,000077 \sin 2X, \end{aligned} \quad (48)$$

sendo X , em radianos, definido como

$$X = 2\pi(n-1)/365, \quad (49)$$

em que n é o número do dia do ano, variando de 1, para 1º de janeiro, a 365, para 31 de dezembro.

3.6.2. Irradiância Solar Refletida

Na Figura 3, verifica-se que a irradiância solar refletida sobre a superfície horizontal plana (I_{dr}) pode ser obtida como

$$I_{dr} = F \bar{D}/D)^2 C_R \cos\alpha_r, \quad (50)$$

em que

C_R = coeficiente de reflexão do refletor;

α_r = ângulo formado entre os raios refletidos e a normal à superfície horizontal.

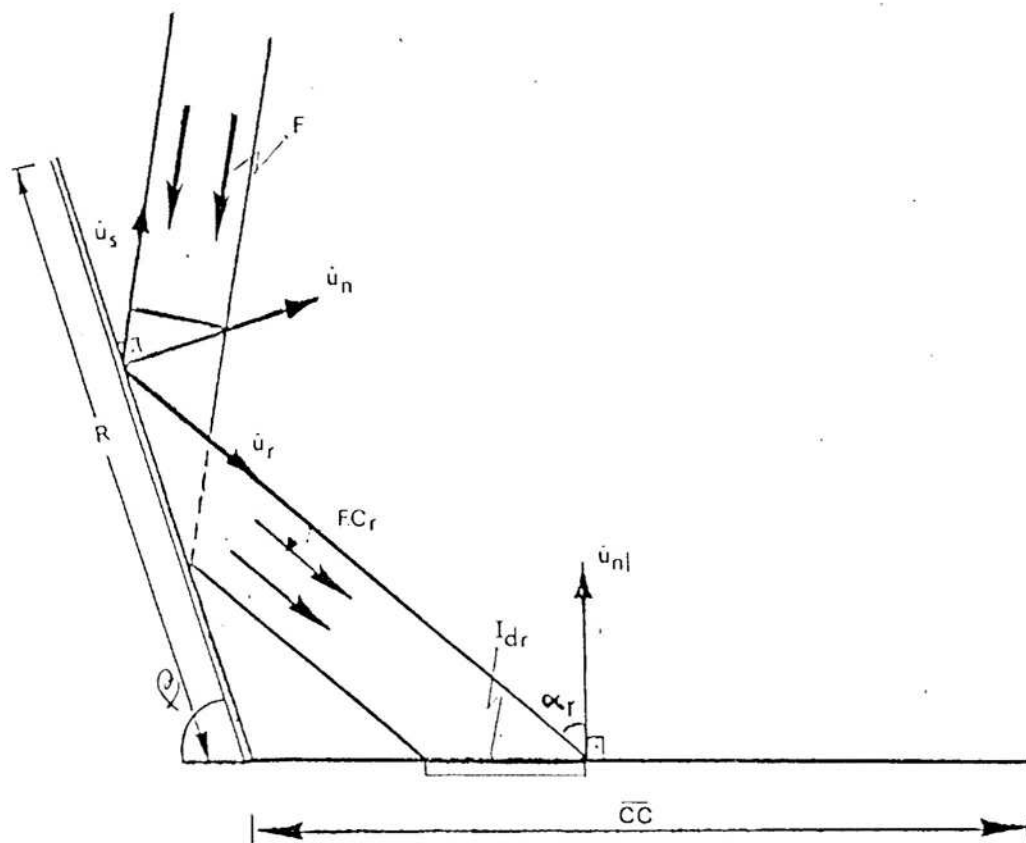


FIGURA 3 - Irradiância Solar Refletida sobre a Superfície Horizontal Receptora (I_{dr}) Definida de Acordo com o Ângulo α_r (Ângulo Formado entre o Feixe de Radiação Refletida e o Vetor Unitário Normal à Superfície Receptora).

3.6.2.1. Cálculo de α_r

O ângulo α_r pode ser obtido a partir do produto interno entre os vetores unitários "raio refletido", \hat{u}_r , e o vetor unitário normal à superfície horizontal, \hat{u}_{nl} , isto é:

$$\hat{u}_r \cdot \hat{u}_{nl} = -\cos\alpha_r. \quad (51)$$

Como

$$\hat{u}_r = r_1 \vec{i} + r_2 \vec{j} + r_3 \vec{k} \text{ e}$$

$$\hat{u}_{nl} = 0 \vec{i} + 0 \vec{j} + 1 \vec{k},$$

tem-se que

$$\cos \alpha_r = |r_3| \quad (52)$$

3.7. Cálculo da Área de Intersecção entre os Raios Refletidos e a Superfície Horizontal

3.7.1. Determinação Geométrica do Ponto P_2 de Intersecção entre o Plano Horizontal (PH) e o Raio Refletido Correspondente ao Raio Incidente no Vértice Superior Esquerdo do Refletor

A equação vetorial da reta que passa pelos pontos P_1 e P_2 , mostrados na Figura 4, pode ser assim expressa:

$$\vec{0P_1} + t \hat{u}_r = \vec{0P_2}, \quad (53)$$

sendo

P_0 = ponto situado na extremidade inferior esquerda do refletor, com coordenadas $(0; \frac{\overline{LC} - \overline{LR}}{2}; 0)$;

P_1 = vértice superior esquerdo do refletor, com coordenadas $(-R \cos\beta; \frac{\overline{LC} - \overline{LR}}{2}; R \sin\beta)$;

P_2 = ponto de intersecção entre o plano horizontal (PH) e o raio refletido correspondente ao raio incidente no vértice superior esquerdo do refletor, com coordenadas $(x_2; y_2; z_2)$;

e

t = um escalar.

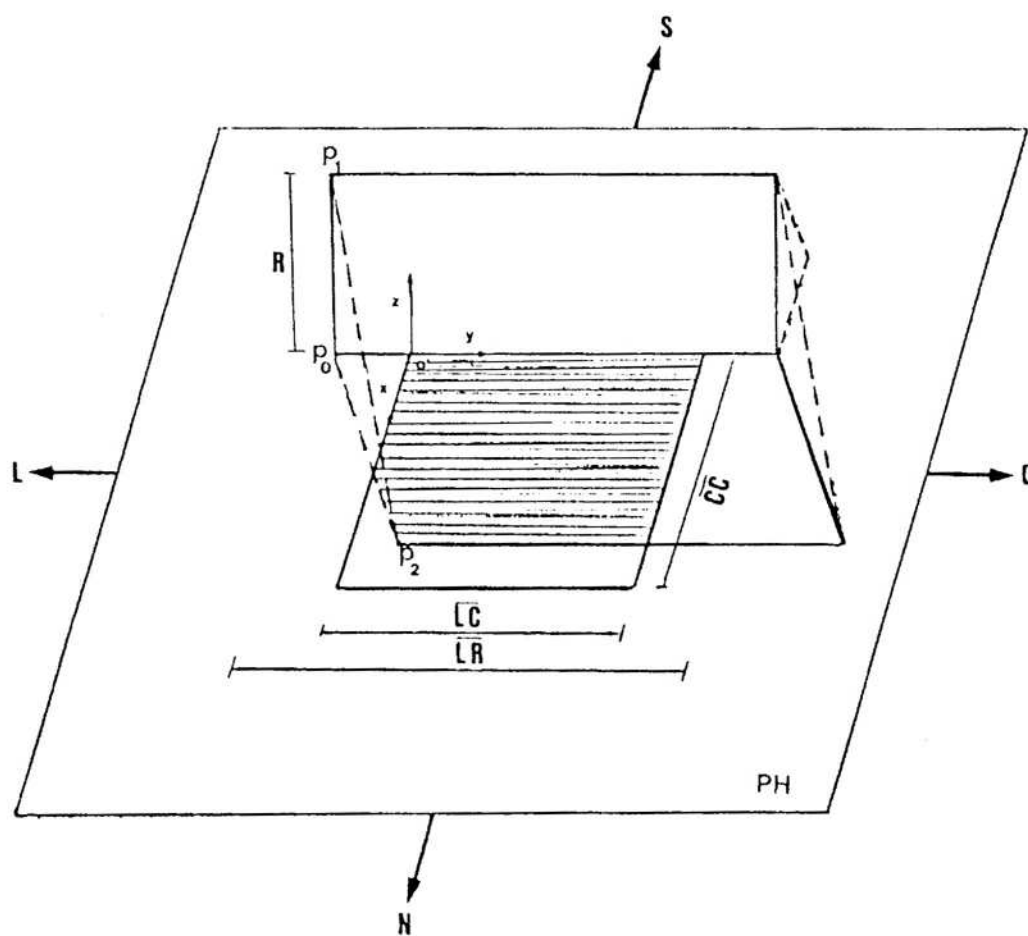


FIGURA 4 - Área da Superfície Horizontal Receptora Iluminada pela Radiação Solar Direta Refletida pelo Refletor Solar.

A equação vetorial da reta que passa pelos pontos P_1 e P_2 , mostrados na Figura 4, pode ser expressa como:

$$\vec{0P_1} + t \hat{u}_r = \vec{0P_2}, \quad (53)$$

sendo

P_0 = ponto situado na extremidade inferior esquerda do refletor, com coordenadas $(0; \frac{\overline{LC} - \overline{LR}}{2}; 0)$;

P_1 = vértice superior esquerdo do refletor, com coordenadas $(-R \cos\beta; \frac{\overline{LC} - \overline{LR}}{2}; R \sin\beta)$;

P_2 = ponto de intersecção entre o plano horizontal (PH) e o raio refletido correspondente ao raio incidente no vértice superior esquerdo do refletor, com coordenadas $(x_2; y_2; z_2)$;

e

t = um escalar.

Conhecidos esses pontos, tornou-se possível a identificação dos seguintes vetores:

$$\vec{0P_1} = (-R \cos\beta) \vec{i} + (R \sin\beta) \vec{k}; \quad (54)$$

$$t \hat{u}_r = (t r_1) \vec{i} + (t r_2) \vec{j} + (t r_3) \vec{k}; \text{ e} \quad (55)$$

$$\vec{0P_2} = (x_2) \vec{i} + (y_2 + \frac{\overline{LR} - \overline{LC}}{2}) \vec{j} + (z_2) \vec{k}. \quad (56)$$

Nas Equações 53, 54, 55 e 56, verificam-se as seguintes relações:

$$-R \cos\beta + t r_1 = x_2; \quad (57)$$

$$t r_2 = y_2 + \frac{\overline{LR} - \overline{LC}}{2}; \text{ e} \quad (58)$$

$$R \sin\beta + t r_3 = 0. \quad (59)$$

Da Equação 59, obtém-se o escalar t como

$$t = -R \sin\beta / r_3. \quad (60)$$

Dessa forma, as coordenadas do ponto P_2 ficam definidas, isto é:

$$P_2 = (-R \cos\beta - R \sin\beta r_1 / r_3; -R \sin\beta r_2 / r_3 + \frac{\overline{LC} - \overline{LR}}{2}; 0). \quad (61)$$

3.7.2. Área Iluminada pelos Raios Refletidos

A definição geométrica da área iluminada pelos raios refletidos dependerá da posição do ponto P_2 (Figura 4).

Foram definidos quatro casos, conforme mostrados nos tópicos subseqüentes, para identificar o ponto P_2 (x_2 , y_2 e 0), em função da largura da superfície horizontal receptora \overline{LC} , do comprimento desta superfície receptora \overline{CC} e das coordenadas x_2 e y_2 daquele ponto.

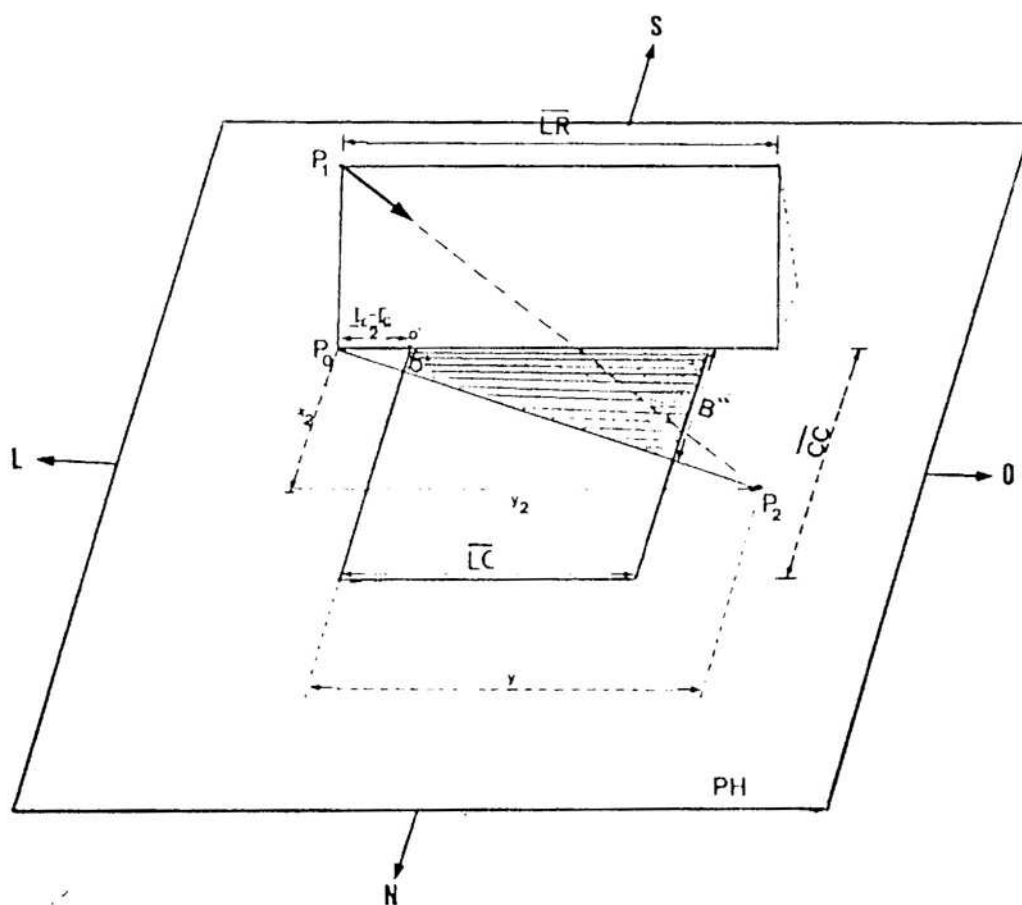
3.7.2.1. Caso 1 - ($y_2 \geq \overline{LC}$ e $x_2 \leq \overline{CC}$)

FIGURA 5 - Área da Superfície Horizontal Receptora Iluminada pela Radiação Solar Direta Refletida pelo Refletor Solar, Considerando-se $y_2 \geq \overline{LC}$ e $x_2 \leq \overline{CC}$ (Caso 1).

Nesse caso, como pode ser verificado na Figura 5, a parte da superfície horizontal iluminada pelos raios refletidos é um trapézio, cuja área (A_{int}) é

$$A_{int} = (B'' + b') \frac{\overline{LC}}{2}, \quad (62)$$

sendo B'' e b' os lados do trapézio indicados na Figura 5. Assim, a área iluminada pelos raios refletidos no plano horizontal será

$$A_{int} = \left[\frac{(\overline{LC} + \overline{LR}) x_2}{2} \frac{1}{y} + \frac{(\overline{LR} - \overline{LC}) x_2}{2} \frac{1}{y} \right] \frac{\overline{LC}}{2}, \quad (63)$$

em que

$$Y = Y_2 + \frac{\overline{LR} - \overline{LC}}{2}. \quad (64)$$

Simplificando a equação anterior, obtém-se

$$A_{int} = \frac{x_2 \cdot \overline{LR} \cdot \overline{LC}}{2y}. \quad (65)$$

3.7.2.2. Caso 2 - ($y_2 \leq \overline{LC}$ e $x_2 \geq \overline{CC}$)

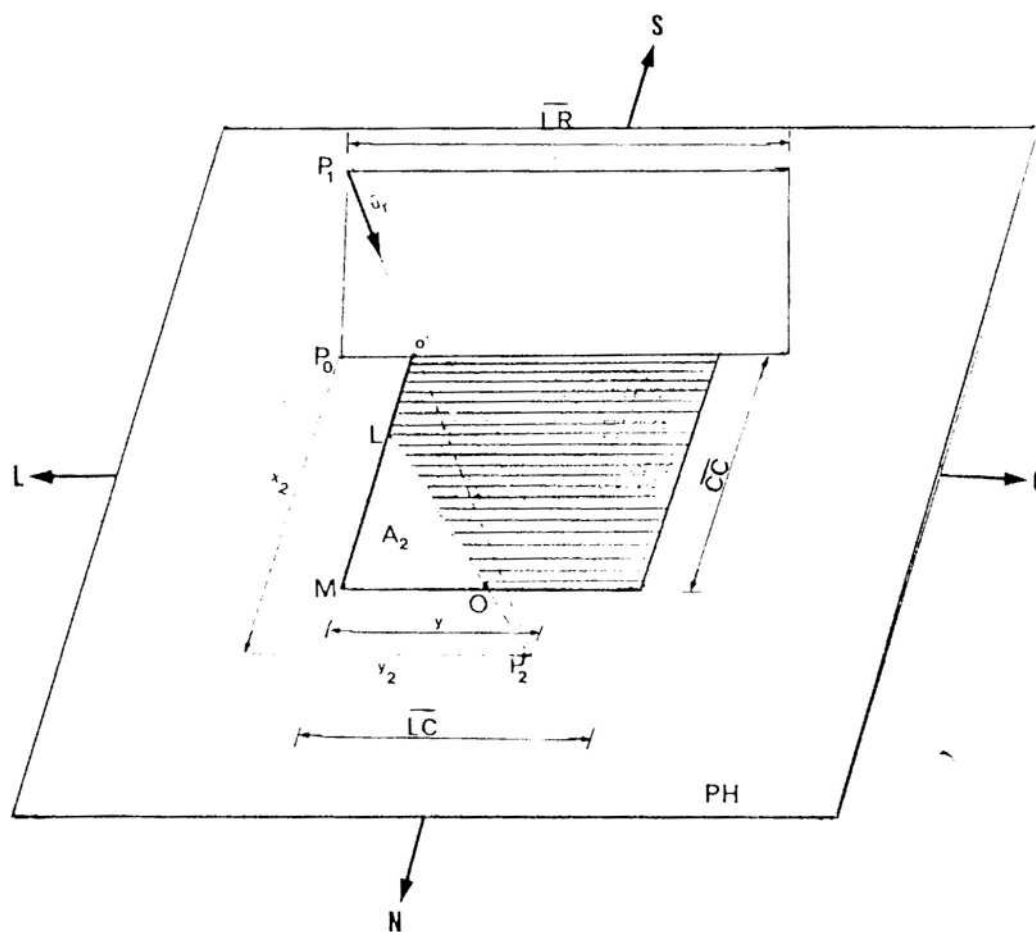


FIGURA 6 - Área da Superfície Horizontal Receptora Iluminada pela Radiação Solar Direta Refletida pelo Refletor Solar, Considerando-se $y_2 \leq \overline{LC}$ e $x_2 \geq \overline{CC}$ (Caso 2).

A área A_2 mostrada na Figura 6 corresponde ao triângulo LMO, que não está recebendo radiação refletida. Conhecendo a área total da superfície horizontal receptora e A_2 , obtém-se, por subtração, a área iluminada pelos raios refletidos (área hachurada na Figura 6), isto é:

$$\overline{LM} = \overline{CC} - \{[(\overline{LR} - \overline{LC})/2] \cdot (x_2/y)\}, \quad (66)$$

logo

$$\overline{LM} = \frac{(2y \overline{CC} - \overline{LR} x_2 + \overline{LC} x_2)}{2y}. \quad (67)$$

Se

$$\overline{MO} = \overline{LM} \cdot y/x_2, \quad (68)$$

então

$$\overline{MO} = \frac{(2y \overline{CC} - \overline{LR} x_2 + \overline{LC} x_2)}{2x_2}. \quad (69)$$

A área do triângulo LMO é, então, dada por

$$A_2 = (\overline{LM} \cdot \overline{MO})/2, \quad (70)$$

isto é:

$$A_2 = \frac{\overline{CC}^2 y}{2x_2} + \overline{CC} \left(\frac{\overline{LC} - \overline{LR}}{2} \right) - \frac{\overline{LC} \overline{LR} x_2}{4y} + \frac{\overline{LR}^2 x_2 + \overline{LC}^2 x_2}{8y}. \quad (71)$$

Assim, a área de intersecção A_{int} será

$$A_{int} = (\overline{LC} \overline{CC}) - A_2 \quad (72)$$

ou

$$A_{\text{int}} = \frac{\overline{CC} (\overline{LC} + \overline{LR})}{2} - \frac{\overline{CC}^2 y}{2x_2} + \frac{\overline{LC} \overline{LR} x_2}{4y} - \frac{\overline{LR}^2 x_2 + \overline{LC}^2 x_2}{8y} \quad (73)$$

3.7.2.3. Caso 3 - ($y_2 < \overline{LC}$ e $x_2 < \overline{CC}$)

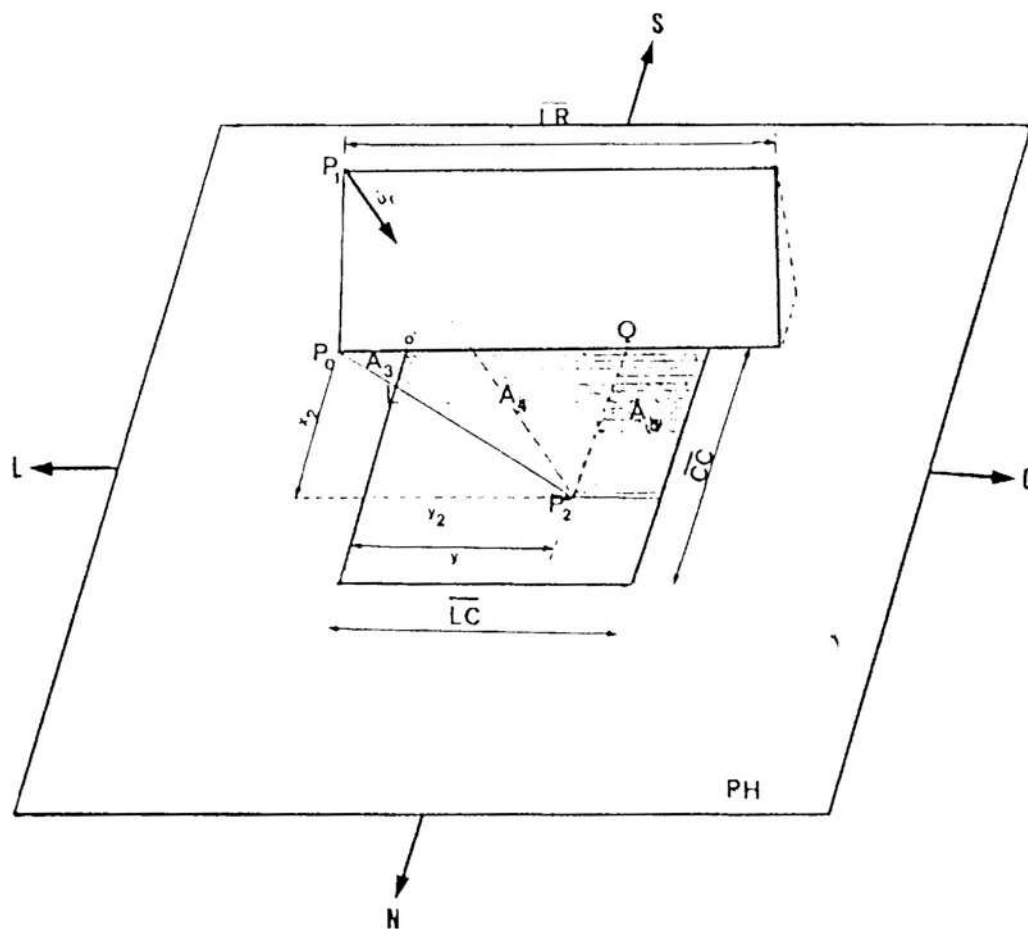


FIGURA 7 - Área da Superfície Horizontal Receptora Iluminada pela Radiação Solar Direta Refletida pelo Refletor Solar, Considerando-se $y_2 < \overline{LC}$ e $x_2 < \overline{CC}$ (Caso 3).

O triângulo P_0P_2Q da Figura 7 é formado pelas áreas A_3 e A_4 , sendo A_4 parte da área da superfície horizontal receptora iluminada pelos raios refletidos. A_5 é identificada como a outra parte da superfície que está recebendo também os raios refletidos. A área do triângulo P_0P_2Q é dada como

$$A_3 + A_4 = (x_2 \cdot y) / 2, \quad (74)$$

de onde se obtém

$$A_4 = (x_2 \cdot y) / 2 - A_3. \quad (75)$$

Por semelhança de triângulos, ΔP_0P_2Q e $\Delta P_0Lo'$, tem-se

$$A_3 = \frac{\frac{\overline{LR} - \overline{LC}}{2} \left(\frac{x_2}{y_2} \right) \frac{\overline{LR} - \overline{LC}}{2}}{2} \quad (76)$$

ou

$$A_3 = \frac{\overline{LR} - \overline{LC}}{8y} x_2. \quad (77)$$

Substituindo a Equação 78 em 76, tem-se

$$A_4 = \frac{x_2 y}{2} + \frac{\overline{LR} \overline{LC} x_2}{4y} - \frac{x_2 (\overline{LR}^2 + \overline{LC}^2)}{8y}. \quad (78)$$

Resta, então, calcular a área A_5 para que se tenha a área total de intersecção. A_5 é obtida como

$$A_5 = [(\overline{LC} + \overline{LR})/2 - y] x_2 \quad (79)$$

ou

$$A_5 = (\overline{LC} x_2/2) + (\overline{LR} x_2/2) - (x_2 y). \quad (80)$$

Assim, a área total de intersecção será dada como

$$A_{int} = A_5 + A_4 = \frac{x_2 (\overline{LC} + \overline{LR} - y)}{2} + \frac{\overline{LR} \overline{LC} x_2}{4y} - \frac{x_2 (\overline{LC}^2 + \overline{LR}^2)}{8y}. \quad (81)$$

3.7.2.4. Caso 4 - ($y_2 > \overline{LC}$ e $x_2 > \overline{CC}$)

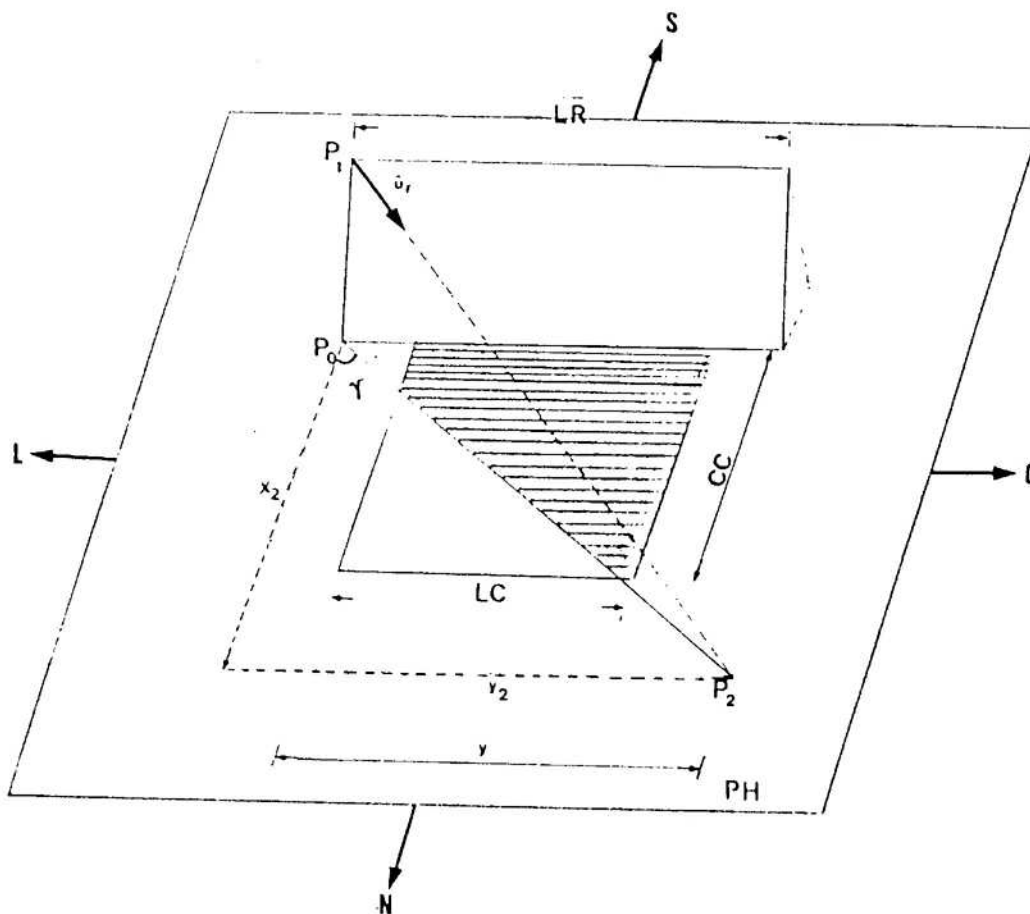


FIGURA 8 - Área da Superfície Horizontal Receptora Iluminada pela Radiação Solar Direta Refletida pelo Refletor Solar, Considerando-se \overline{LC} e $x_2 > \overline{CC}$ (Caso 4).

Como pode ser verificado na Figura 8, o Caso 4 pode ser apresentado sob duas maneiras:

- 1ª) quando $\gamma \leq 45^\circ$; e
- 2ª) quando $\gamma > 45^\circ$.

O ângulo γ é definido como sendo o ângulo complementar daquele formado entre a coordenada x_2 do ponto P_2 e y (calculado conforme a Equação 64). Dessa forma, o cálculo da área de intersecção dependerá de cada situação. Assim, se $(x_2/y) \leq \{\overline{CC}/[(\overline{LR}+\overline{LC})/2]\}$, a área de intersecção será calculada por meio da Equação 65, obtida no Caso 1. Se $(x_2/y) > \{\overline{CC}/[(\overline{LR}+\overline{LC})/2]\}$, a área de intersecção será calculada por intermédio da Equação 73, obtida no Caso 2.

3.8. Determinação do Ganho Adicional de Energia Solar Direta na Superfície Horizontal

Conhecidas a irradiância solar direta sobre a superfície horizontal, I_d , a irradiância solar refletida sobre a mesma superfície horizontal, I_{dr} , a área total da superfície horizontal receptora e a área iluminada pelos raios refletidos, A_{int} , o ganho adicional instantâneo de energia solar pelo uso do refletor, \overline{GI} , é dado por

$$\overline{GI} = \frac{I_{dr} \cdot A_{int}}{\overline{LC} \cdot \overline{CC}} \quad (\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}). \quad (82)$$

Desejando-se conhecer o ganho adicional diário de radiação solar direta (GD), basta determinar os horários inicial e final de reflexão e proceder à seguinte integração:

$$GD = \sum_{i=1}^n \overline{GI} \Delta t_i \quad (\text{J/m}^2), \quad (83)$$

em que n é o número de intervalos de tempo considerado; Δt_i , o i -ésimo intervalo de tempo, em segundos (recomenda-se que Δt_i não seja superior a uma hora); e \overline{GI} , o ganho instantâneo (W/m^2), calculado para o instante intermediário no intervalo Δt_i .

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Inclinação do Refletor

Para efeito de cálculos, considerou-se o coeficiente de reflexão do refletor igual a 1.

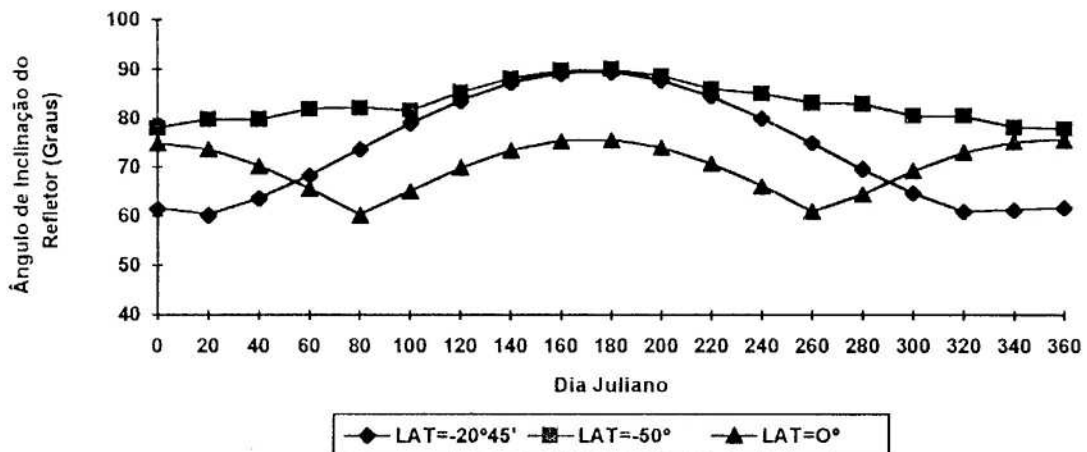


FIGURA 9 - Ângulo de Inclinação Ideal do Refletor (β) em Função do Dia do Ano, Considerando-se $\overline{R}=\overline{LC}$ e Altura do Refletor Adequada (Definida no Apêndice A, em Função da Latitude), para as Latitudes 0° , $20^\circ45'S$ e $50^\circ S$.

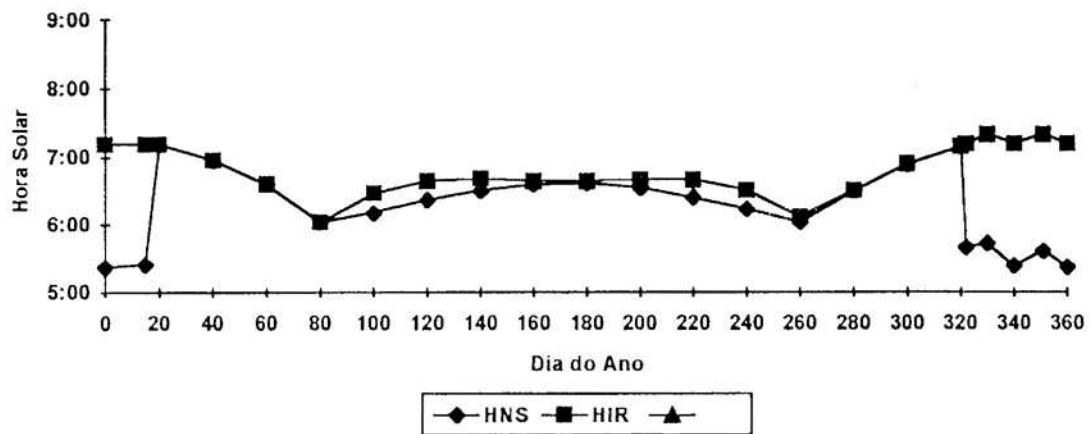
Na Figura 9, apresenta-se o ângulo de inclinação ideal do refletor (β), obtido pelas Equações 6 e 7, para o meio-dia solar, para as latitudes de 0° , $20^\circ 45' S$ (Viçosa-MG) e $50^\circ S$, em função do dia do ano. Verifica-se nessa figura, para as latitudes de $20^\circ 45' S$ e $50^\circ S$, que a melhor inclinação do refletor tende para 90° em relação à superfície coletora, na medida em que o inverno se aproxima. O valor máximo para o ângulo de inclinação do refletor ($\beta=90^\circ$) é verificado no solstício de inverno ($n=173$; dia 21 de junho). Contrariamente, os menores valores de inclinação do refletor ocorrem nos dias em que a declinação do Sol apresenta valores mais próximos da latitude local ($n=18$, dia 18 de janeiro e $n=326$, dia 22 de novembro). No período compreendido entre os dias 22/11 ($n=326$) e 18/01 ($n=18$), em Viçosa, o refletor deve ser voltado para o Sul. O critério estabelecido para definir os dias em que se deverá mudar a orientação do refletor é baseado naqueles dias em que, no plano da trajetória aparente do Sol, estiver contido o zênite local, ou seja, o refletor deve ser mudado de orientação naqueles dias em que a declinação do Sol apresentar o valor igual ao da latitude local. Para a latitude de 0° , essa mudança deverá ser feita nos dias de equinócio (21 de março e 23 de setembro). Já na latitude de $50^\circ S$, não haverá necessidade de mudar a orientação do refletor, uma vez que o Sol incide durante todo o ano em sua face voltada para o Norte.

4.2. Horário de "Nascer" do Sol para o Refletor(HNS) e Horário de Início da Reflexão (HIR) em Direção à Superfície Receptora

O horário em que o Sol "nasce" para o refletor foi determinado conforme metodologia desenvolvida por ALVES et alii (1982), enquanto o horário do início da incidência dos raios refletidos na superfície receptora (horizontal) o foi seguindo a metodologia descrita no presente trabalho.

A Figura 10 ilustra o horário do "nascer" do Sol para o refletor (HNS), durante todo o ano, para a latitude de Viçosa-MG, assim como aquele em que se inicia a reflexão dos raios solares em direção à superfície horizontal (HIR). Apresenta-se na parte "a" dessa mesma figura o ângulo ideal de inclinação do refletor (β ideal), em função do dia do ano, para o período compreendido entre os dias julianos 19 (19 de janeiro) e 325 (21 de novembro), período no qual o refletor está voltado para o Norte; nos demais dias do ano, fica orientado para o Sul. Essa mudança de orientação provocou a queda na curva do horário do "nascer" do Sol (HNS) do dia 324 (20 de novembro) para o dia 325 (21 de novembro) e a subida do dia 19 (19 de janeiro) para o dia 20 (20 de janeiro), sendo esses horários correspondentes ao "nascer" astronômico do Sol. De acordo com o ábaco das trajetórias aparentes do Sol para a latitude de Viçosa, apresentado por ALVES et alii (1987), verifica-se que, entre os dias 266 (23 de setembro) e 330 (26 de novembro) e também entre os dias 18 (18 de janeiro) e 80 (21 de março),

a)



b)

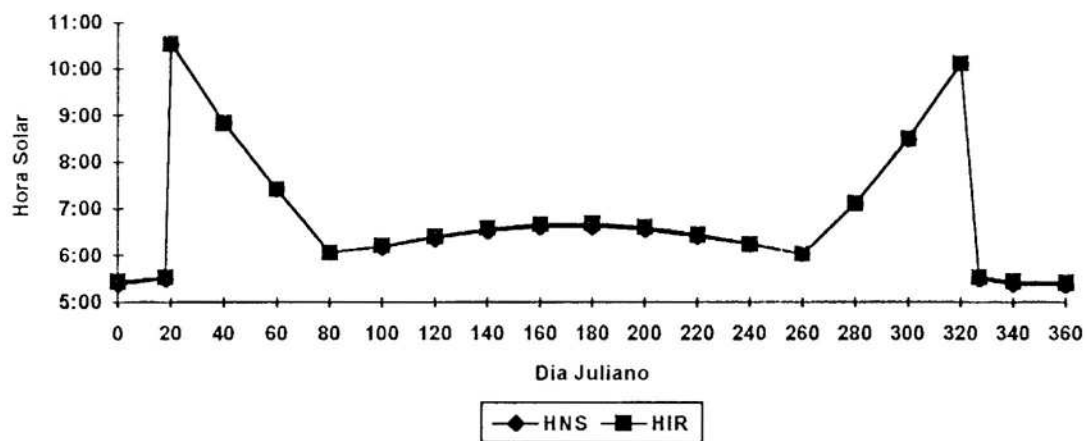


FIGURA 10 - Horário do "Nascer" do Sol para o Refletor (HNS) e o Horário do Início da Reflexão (HIR) para a Superfície Horizontal, em Função do Dia do Ano: (a) O Coletor Apresenta Inclinação Ideal, β (valores diários), e (b) o Coletor Apresenta Inclinação Constante, $\beta=90^\circ$ (refletor fixo), para Latitude de $20^\circ 45'S$ (Viçosa, MG).

o Sol incide nas duas faces do refletor ao longo do dia, ressaltando-se que no início e fim do dia esta incidência se dá na face voltada para o Sul. Dessa forma, justifica-se a redução do período de incidência dos raios solares na face do refletor voltada para o Norte, entre os dias 266 (23 de setembro) e 330 (26 de novembro), assim como o aumento desse período entre os dias 18 (18 de janeiro) e 80 (21 de março).

Para o período compreendido entre os dias julianos 80 (21 de março) e 266 (23 de setembro), os horários HNS e HIR apresentam-se distintos (Figura 10a), à exceção do solstício de inverno. Tal fato está relacionado com a inclinação do refletor associada à elevação do Sol no instante HNS, não proporcionando a reflexão dos raios solares na direção da superfície horizontal no momento em que se inicia a incidência de radiação solar direta no refletor. Observa-se que, na medida em que o refletor se mostra menos inclinado em relação ao plano horizontal, a diferença entre HIR e HNS torna-se mais acentuada. O fato de nos demais dias do ano, em que o refletor está voltado para o Norte, verificar-se, no instante em que o Sol nasce para essa direção, uma elevação solar suficiente para que a componente r_3 do raio refletido seja negativa (os horários do "nascer" do Sol para o refletor e para Viçosa-MG não coincidem) justifica a coincidência das curvas HNS e HIR nesse período.

Ainda com relação à Figura 10a, nos dias em que o refletor está voltado para o Sul, observa-se que o horário

inicial de incidência da radiação solar no refletor é o mesmo do nascer astronômico do Sol. Como a inclinação do refletor é definida para o meio-dia solar, verifica-se que, além de esta inclinação apresentar-se desfavorável à reflexão da radiação solar direta nos horários indicados pela curva HNS, o Sol encontra-se com elevação nula, o que justifica a enorme diferença entre HNS e HIR nesse período.

Na Figura 10b, considera-se constante a inclinação do refletor durante todo o ano. O ângulo considerado foi aquele que proporciona melhor aproveitamento da energia solar nos dias mais frios do ano, encontrando-se, para Viçosa, $\beta=90^\circ$. Observa-se em tal figura que os horários indicados pelas curvas HNS e HIR são coincidentes durante todo o ano. O refletor, por apresentar-se mais inclinado em relação à situação descrita na Figura 10a, favorece a condição negativa ou nula da componente r_3 do vetor raio refletido no instante do nascer do Sol para o refletor. Porém, o período em que o refletor contribui para o ganho de energia solar na superfície horizontal durante todo o ano é, em média, menor que na situação vista na Figura 10b.

4.3. Área da Superfície Horizontal Receptora Iluminada pelos Raios Solares Refletidos

A Figura 11 ilustra a porcentagem da área da superfície horizontal receptora iluminada pelos raios

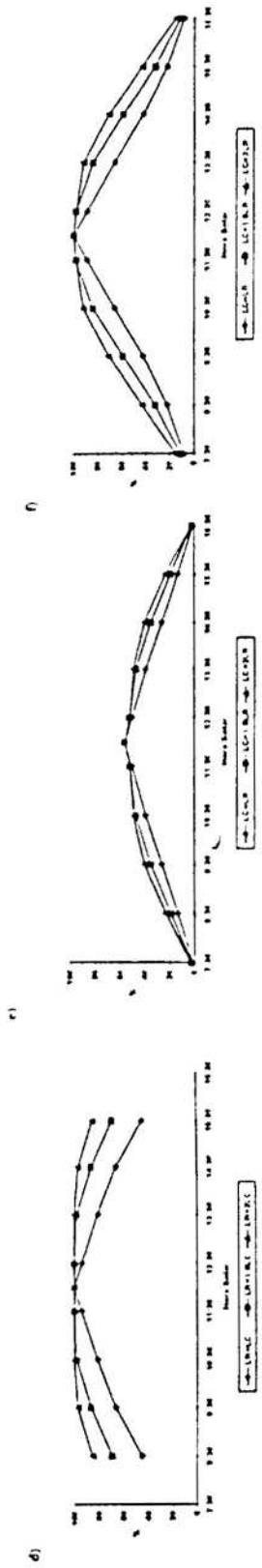
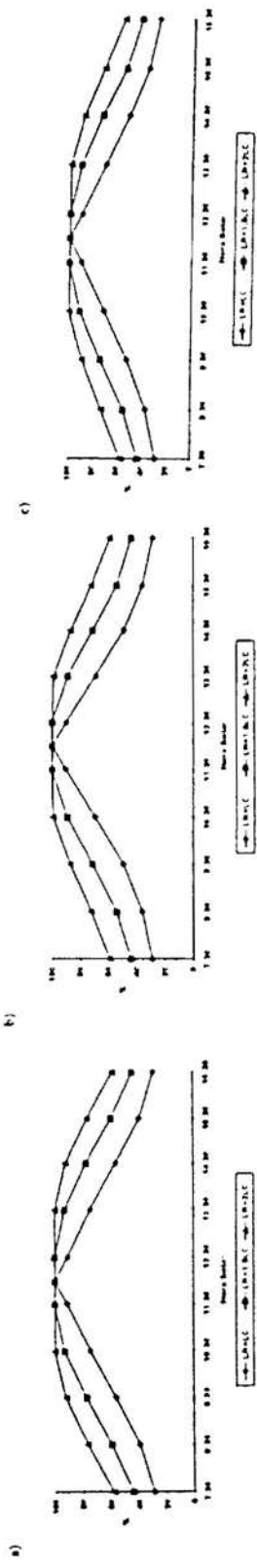
refletidos nos horários indicados, para os dias de solstício de inverno (21 de junho) e solstício de verão (22 de dezembro)¹, considerando-se a inclinação ideal diária do coletor. Os horários indicados na Figura 11 referem-se ao instante intermediário do intervalo de tempo considerado para efeito de cálculo. Essa figura permite analisar a progressão desta área até que haja uma superposição de 100% com a superfície horizontal receptora ao meio-dia, já que a inclinação do refletor foi definida com base nessa condição.

O acréscimo na largura do refletor em relação ao da superfície receptora proporciona acréscimo da área de intersecção entre os raios refletidos e esta superfície ao longo do dia. Tal fato, evidentemente, deve-se ao deslocamento do ponto P_2 (tópico 3.7.1), que, de acordo com a largura do refletor considerada, se apresenta em diferentes posições geométricas.

As curvas mostradas na Figura 11, apesar de indicarem as mesmas tendências quando comparadas devidamente, revelam, as três situações (diferentes larguras do refletor em relação à da superfície receptora), que os melhores resultados proporcionados pelo refletor são obtidos no solstício de inverno, em que se verificam os maiores valores de área iluminada pelos raios refletidos

1 Para a latitude de $-20^{\circ}45'$ (Viçosa-MG), nenhuma figura foi apresentada considerando $\beta=90^{\circ}$ para o dia de solstício de verão (22/12), pelo fato de que, além de o refletor ter sido fixo e voltado para o Norte e, nesse dia e nessa latitude, o Sol ter incidido na face refletora voltada para o Sul, não houve qualquer contribuição do refletor para o ganho de radiação solar direta na superfície refletora.

FIGURA 11 - Porcentagem da Área da Superfície Horizontal Receptora Iluminada pelos Raios Solares Refletidos ao Longo do Dia, para Diferentes Larguras de Refletor, Diferentes Latitudes e Diferentes Épocas do Ano, Considerando a Altura Ideal do Refletor (Definido Conforme Apêndice A): (a) β Ideal - Solstício de Inverno (21/06) - Lat. $20^{\circ}45' S$ - $\overline{CC}=R$; (b) β Ideal - Solstício de Verão (22/12) - Lat. $20^{\circ}45' S$ - $\overline{CC}=R$; (c) β Ideal = β Fixo (75°) - Solstício de Inverno (21/06) - Lat. 0° - $\overline{CC}=R$ (no Solstício de Verão (22/12), na latitude 0° , observam-se os mesmos valores apresentados para o Solstício de Inverno); (d) β Ideal = β Fixo (90°) - Solstício de Inverno (21/06) - Lat. $50^{\circ} S$ - $\overline{CC}=R/0,3$; (e) β Fixo (90°) - Solstício de Verão (22/12) - Lat. $50^{\circ} S$ - $\overline{CC}=R$ e (f) β Ideal (65°) - Solstício de Verão - (22/12) - Lat. $50^{\circ} S$ - $\overline{CC}=R$.



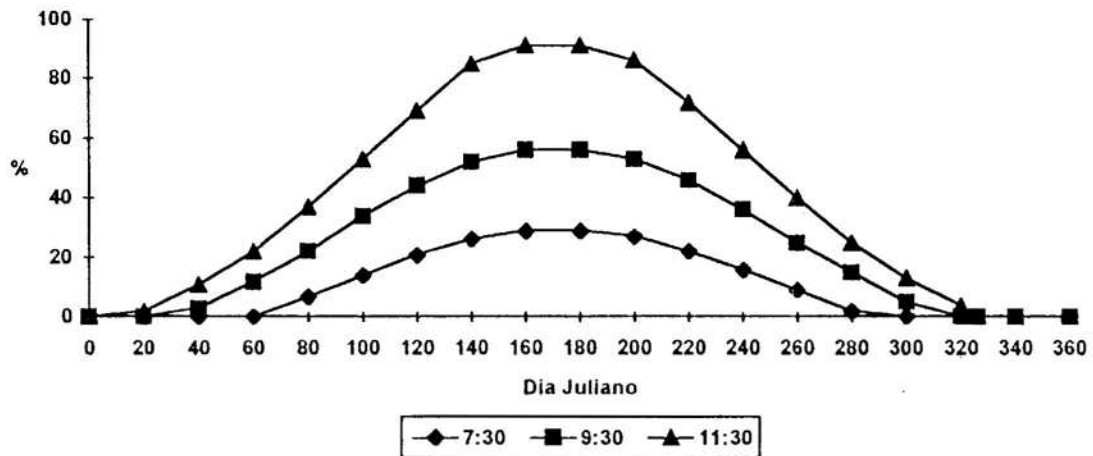
durante todo o dia (exceto ao meio-dia, quando a sobreposição é de 100%, como já mencionado).

A contribuição do refletor para o aumento da irradiância solar direta, incidente em uma superfície horizontal, pode ser também verificada na Figura 12. Esta figura ilustra a porcentagem da área da superfície horizontal iluminada pelos raios refletidos, em diferentes horários, ao longo do ano, considerando-se $\beta=90^\circ$ (fixo) (Figura 12a) e o β ideal diário (Figura 12b). Observa-se, mais uma vez nessa figura, a melhor eficiência do refletor em dias de inverno, pois a área iluminada pelos raios refletidos nessa época é maior que no período de verão para qualquer horário do dia, excetuando-se o meio-dia solar, quando a inclinação do refletor é a ideal, conforme discutido anteriormente.

O fato de a inclinação do refletor ser definida de forma que, ao meio-dia solar, em toda a superfície horizontal exista incidência de raios refletidos pode explicar os valores altos e praticamente constantes, aproximando-se de 100%, na representação do horário de 11:30 (Figura 12b).

Estando o refletor fixo durante todo o ano, com inclinação de 90° , observa-se que essa inclinação se apresenta menos adequada para os dias do ano que se encontram mais distantes do solstício de inverno, como ilustrado na Figura 9. Tal fato é evidenciado pelo decréscimo dos valores de área iluminada observado no horário solar de 11:30 ao longo do ano (Figura 12a). Mesmo

a)



b)

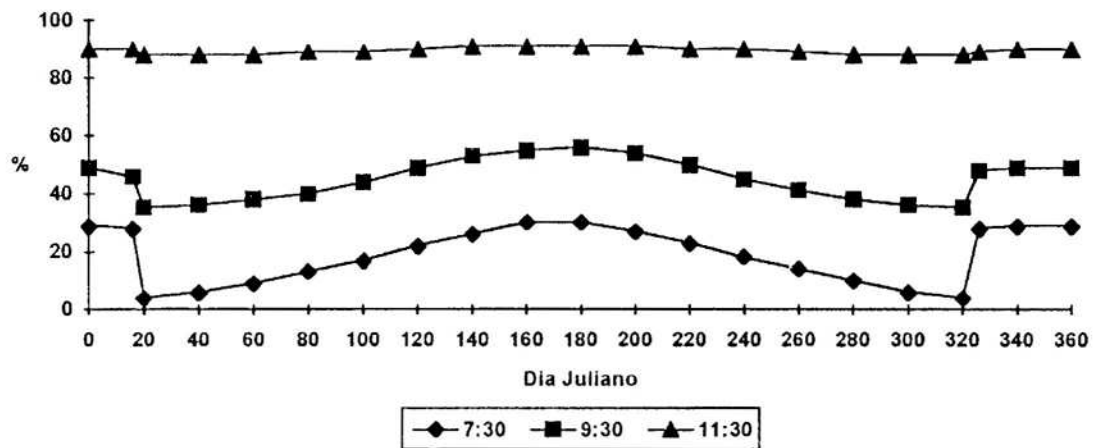


FIGURA 12 - Porcentagem da Área da Superfície Horizontal Receptora, Iluminada pelos Raios Solares Refletidos, ao Longo do Ano, para Alguns Horários, para a Latitude de $20^{\circ}45'S$ (Viçosa-MG), Considerando-se Largura do Refletor Igual à da Superfície Receptora ($\overline{R}=\overline{LC}$): (a) β Fixo (90°) - Refletor voltado para o Norte; (b) β Ideal.

nessa situação, em que o refletor se apresenta menos eficiente, verifica-se um aumento da área da superfície horizontal beneficiada pelos raios solares refletidos no decorrer do dia. Uma vez mais nessa figura, observa-se a maior contribuição do refletor ao meio-dia solar.

Observa-se ainda na Figura 12a que, para o período compreendido entre 22/11 (n=326) e 18/01 (n=18), não há incidência dos raios refletidos no coletor. Tal fato se deve ao posicionamento do refletor, que, por ser fixo na vertical durante todo o ano e apresentar sua face refletora voltada para o Norte, se torna inútil nessa época. Como já mencionado anteriormente, nesse período, na latitude de 20° 45' S (Viçosa-MG), o Sol incide na face do refletor voltada para o Sul.

4.4. Ganho de Radiação Solar Direta

Apesar de a área da superfície receptora iluminada pelos raios refletidos ser um bom indicador do ganho de radiação solar direta, este fator, isoladamente, não permite prever satisfatoriamente o ganho de radiação solar na superfície receptora. O fato de a porcentagem da área iluminada pelos raios solares refletidos chegar a valores da ordem de 100% ao meio-dia solar não implica, necessariamente, que o ganho de radiação solar na mesma superfície apresenta o mesmo índice. Para que a porcentagem

da área iluminada pelos raios refletidos seja a mesma do ganho de radiação na superfície, é necessário que as densidades de fluxo de radiação solar direta e de radiação solar refletida apresentem o mesmo valor. Para tanto, se o refletor mostrar um coeficiente de refletividade igual a 1,0, os ângulos zenital do Sol e α_r (ângulo formado entre o feixe de radiação solar direta refletida e o vetor normal à superfície horizontal) deverão ser iguais.

Na Figura 13, apresentam-se curvas que se assemelham bastante às apresentadas na Figura 11. Verifica-se, na Figura 13, a relação direta entre a área iluminada pelos raios solares refletidos e o ganho de radiação direta na superfície horizontal receptora. Contudo, observa-se que os valores de ganho e de área (Figura 11) não são os mesmos, apresentando-se mais diferenciados no solstício de verão. Nesse período, a irradiância solar direta apresenta valores mais elevados e, portanto, com alta densidade de fluxo da radiação solar direta. Já a densidade de fluxo da radiação solar refletida apresenta valores mais baixos, por estar associada a um ângulo α_r maior que o ângulo zenital do Sol. Tal fato se deve aos menores valores de β (ângulo de inclinação do refletor em relação ao plano horizontal) para essa época².

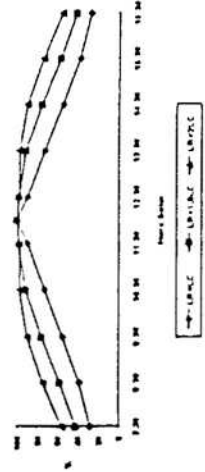
2 Para a latitude de $-20^{\circ}45'$ (Viçosa-MG), nenhuma figura foi apresentada considerando $\beta=90^{\circ}$ para o dia de solstício de verão (22/12), pelo fato de que, além de o refletor ter sido fixo e voltado para o Norte e, nesse dia e nessa latitude, o Sol ter incidido na face refletora voltada para o Sul, não houve qualquer contribuição do refletor para o ganho de radiação solar direta na superfície refletora.

FIGURA 13 - Ganho Percentual de Radiação Solar Direta na Superfície Horizontal Receptora ao Longo do Dia, para Diferentes Larguras do Refletor, Diferentes Latitudes e Diferentes Épocas do Ano: (a) β Ideal = β Fixo (90°) - Solstício de Inverno (21/06) - Lat. $20^\circ 45'$ S - $\overline{CC}=R$; (b) β Ideal (60°) - Solstício de Verão (22/12) - Lat. $20^\circ 45'$ S - $\overline{CC}=R$; (c) β Ideal = β Fixo (75°) - Solstício de Inverno (21/06) = Solstício de Verão (22/12) - Lat. 0° - $\overline{CC}=R$; (d) β Ideal = β Fixo (90°) - Solstício de Inverno (21/06) - Lat. -50° - $\overline{CC}=R/0,3$; (e) β Fixo (90°) - Solstício de Verão (22/12) - Lat. 50° S - $\overline{CC}=R$; (f) β Ideal (65°) - Solstício de Verão (22/12) - Lat. 50° S - $\overline{CC}=R$; (g) β Ideal (92°) - Solstício de Inverno (21/06) - Lat. 50° S - $\overline{CC}=R/0,4$ - $\overline{LR}=\overline{LC}$; (h) β Ideal (90°) - Solstício de Inverno (21/06) - Lat. $20^\circ 45'$ S - $\overline{LR}=\overline{LC}$ e (i) β Ideal (75°) - Solstício de Inverno (21/06) - Lat. 0° - $\overline{LR}=\overline{LC}$.

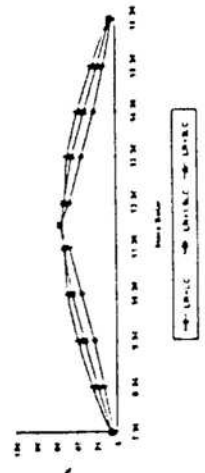
2 3 4

5 6 7

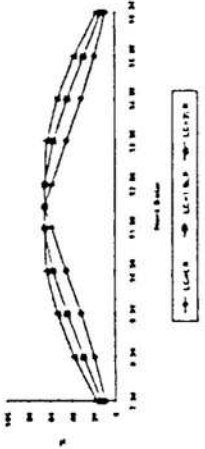
a)



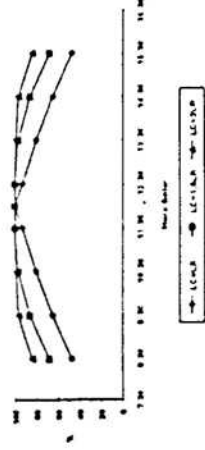
b)



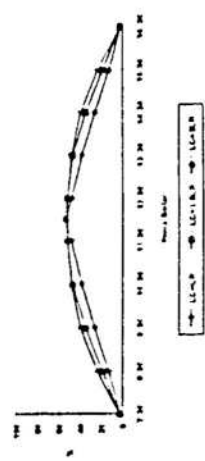
c)



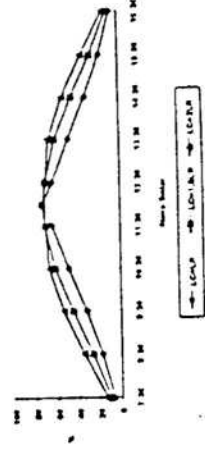
d)



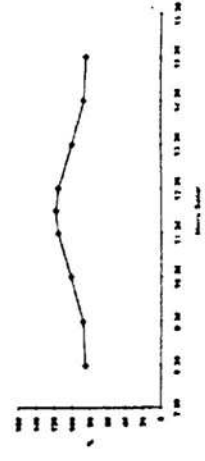
e)



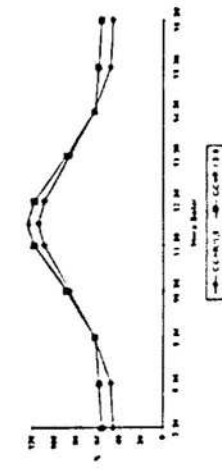
f)



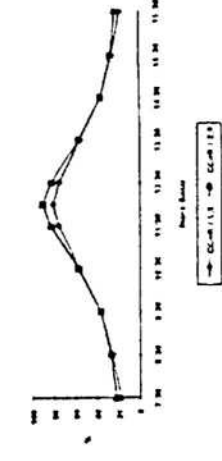
g)



h)



i)



Verifica-se na Figura 13a que, para as condições de inverno em Viçosa-MG ($\varphi = 20^{\circ} 45' S$), o uso do refletor proporciona ganhos de radiação solar direta que podem chegar a valores próximos a 100%, dependendo da largura desse refletor em relação à da superfície receptora horizontal. Esses resultados se aproximam dos obtidos por CLARK e DICKINSON (1980), em Grants, Novo México ($\varphi = 35^{\circ} N$), que no inverno, utilizando um sistema combinado refletor-SSP, obtiveram aumentos de radiação solar direta no coletor da ordem de 100%.

A baixa densidade de fluxo de radiação solar direta, em função dos elevados valores do ângulo zenital associados à proximidade desses valores com os de α_r no inverno (Figura 14), explica a maior eficiência do refletor nesse período. Como mencionado anteriormente, os fatores que determinam maior ou menor ganho de radiação solar direta são o coeficiente de refletividade do refletor, a área da superfície receptora iluminada pelos raios refletidos e a diferença entre os ângulos zenital do Sol e α_r . Dessa forma, observou-se que, no inverno, este último fator pouco contribui (valores muito próximos - Figura 14a) para o ganho de radiação solar direta. Assim, torna-se evidente que o fator predominante para obtenção de um ganho considerável de radiação no inverno é a área da superfície horizontal receptora iluminada pelos raios refletidos. Por essa razão, explica-se a grande semelhança entre a Figura 11a (Hora X Área Iluminada - solstício de inverno) e a

Figura 13a (Hora X Ganho de Radiação Direta - solstício de inverno).

No verão, como pode ser visto na Figura 14b, o ângulo zenital do Sol, em todos os horários, apresenta-se consideravelmente menor que o ângulo de incidência dos raios refletidos na superfície horizontal, indicando, assim, que durante todo o dia a densidade do fluxo de radiação direta é sempre maior que a irradiância refletida, justificando, dessa forma, a menor eficiência do refletor nessa época. Em tal situação, não há como considerar a área iluminada pelos raios refletidos como fator predominante para o ganho de radiação solar direta. Nesse caso, a diferença entre o ângulo zenital do Sol e o ângulo α_r é também significativa. Tal diferença, como visto na Figura 14b, apresenta-se bastante expressiva, justificando a diferença entre as Figuras 11b (Hora X Área Iluminada - solstício de verão) e 13b (Hora X Ganho de Radiação Direta - solstício de verão).

Como verificado na Figura 13(itens g e h), para altas e médias latitudes, é possível obter ganhos maiores que 100% (a irradiância solar direta na superfície horizontal é menor que a refletida). Tal fato se deve aos elevados valores do ângulo zenital do Sol (principalmente no inverno) nos diversos horários do dia e, conseqüentemente, à baixa densidade do fluxo de radiação solar direta nessas latitudes. Nessa situação, o ângulo α_r apresenta-se menor que o ângulo zenital do Sol, proporcionando valores mais elevados para a irradiância

solar refletida em relação à irradiância solar direta (Figura 14g). Vale ressaltar que tal situação só pode ser observada se for utilizada uma altura do refletor maior que a definida no Apêndice A. Já nas latitudes mais baixas, como observado na Figura 13i, o aumento da altura do refletor não contribuiu significativamente para o ganho de radiação solar direta na superfície receptora.

A análise das Figuras 13 e 14 permitiu observar a dependência direta entre o ganho de radiação solar direta em uma superfície horizontal receptora, num dado horário do dia, e a diferença entre os ângulos α_r e o zenital do Sol. Observa-se nessas figuras que, quando o ângulo α_r se apresenta maior que o zenital do Sol (densidade do fluxo de radiação solar direta maior que a densidade do fluxo de radiação solar refletida), não são verificados valores de ganho de radiação solar direta superiores ou iguais a 100%. Contrariamente, observa-se, na Figura 13g, que valores desse ganho maiores que 100% são obtidos quando o ângulo α_r se apresenta com valores menores que os do ângulo zenital do Sol (Figura 14g). Nos itens a e d da Figura 13, observa-se o ganho de radiação solar direta igual a 100%, obtido ao meio-dia solar (área da superfície receptora iluminada pelos raios solares refletidos igual a 100%). Isso se deve ao fato de o refletor estar posicionado perpendicularmente à superfície horizontal receptora e, assim, proporcionar um ângulo α_r igual ao ângulo zenital do Sol (Figura 14 - itens a e d).

Na Figura 15, mostram-se, uma vez mais, os maiores ganhos de radiação no inverno com relação ao verão. Tais ganhos diminuem gradativamente na medida em que o Sol se aproxima, ao meio-dia solar, do zênite local, chegando então a não haver contribuição do refletor (para $\beta=90^\circ$), o que, para o caso observado na Figura 15a (Viçosa, $\phi = 20^\circ 45'S$), ocorre nos dias julianos 18 (18/01) e 326 (22/11). Nesses dias, a declinação do Sol apresenta-se igual à latitude local. Para a latitude 0° (Figura 15b), observa-se a mesma situação nos dias de equinócio, já que nesses dias a declinação do Sol se apresenta com valor igual ao da latitude. Já para a latitude $45^\circ S$, verifica-se que, apesar de no plano da trajetória aparente do Sol não se encontrar o zênite local em nenhum dia do ano, o refletor, mesmo estando fixo, contribui durante todo o ano para o ganho de radiação solar direta na superfície receptora.

A Figura 16 ilustra o ganho percentual de radiação solar direta pelo uso de refletores, para diferentes latitudes, nos dias de solstício e de equinócio. Observa-se nessa figura que, para qualquer latitude, a eficiência do refletor é sempre maior no dia em que a declinação do Sol se apresenta mais diferenciada em relação à latitude local (Sol mais distante do zênite local, ao meio-dia). Pelos resultados mostrados na Figura 16, consideram-se a inclinação do refletor como a ideal e a sua altura mais apropriada, isto é, a altura intermediária entre a máxima aconselhável para o refletor e a mínima permitida. Tais valores foram obtidos conforme descrito no Apêndice A.

FIGURA 14 - Ângulo Zenital do Sol e Ângulo de Incidência dos Raios Solares Refletidos na Superfície Horizontal Receptora (α_r) ao Longo do Dia, Considerando-se β Ideal, e $\overline{R} = \overline{LC}$: (a) Solstício de Inverno (21/06) - Lat. $20^\circ 45' S$ - $\overline{CC} = R$ - β Ideal = β Fixo (90°); (b) Solstício de Verão (22/12) - Lat. $20^\circ 45' S$ - $\overline{CC} = R$ - β Ideal (60°); (c) Solstício de Inverno (21/06) = Solstício de Verão (22/12) - Lat. 0° - $\overline{CC} = R$ - β Ideal = β Fixo (75°); (d) Solstício de Inverno (21/06) - Lat. $50^\circ S$ - $\overline{CC} = R/0,3$ - β Ideal = β Fixo (90°); (e) Solstício de Verão (22/12) - Lat. $50^\circ S$ - $\overline{CC} = R$ - β Fixo (90°); (f) Solstício de Verão (22/12) - Lat. $50^\circ S$ - $\overline{CC} = R$ - β Ideal (65°); (g) e Solstício de Inverno (21/06) - Lat. $50^\circ S$ - $\overline{CC} = R/0,4$ - β Ideal (92°)

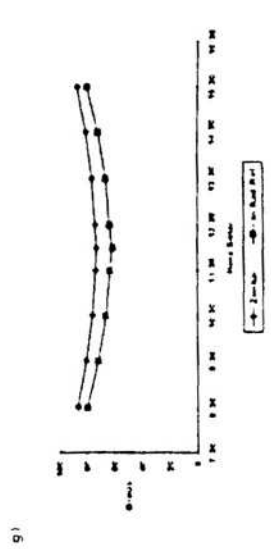
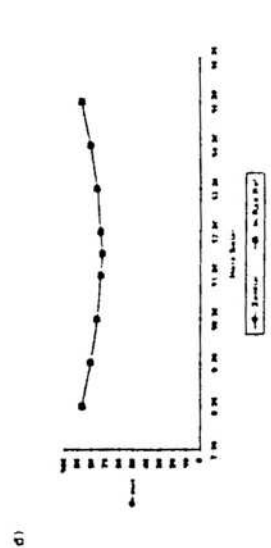
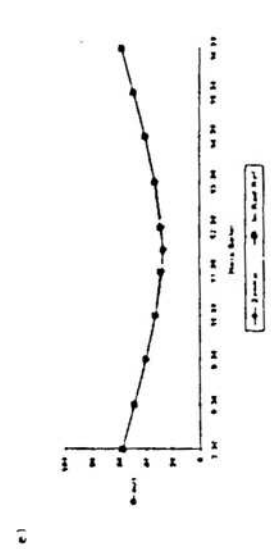
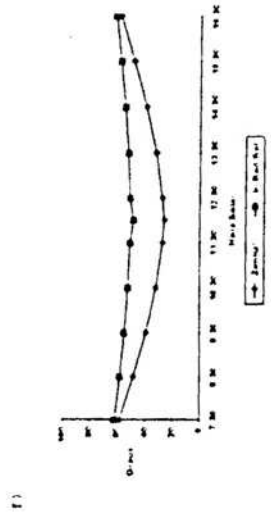
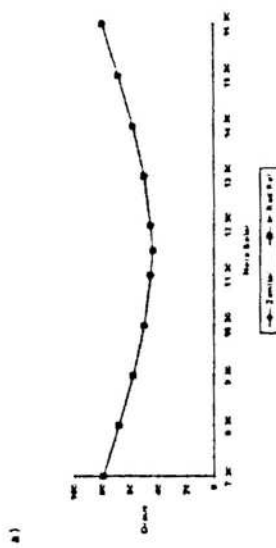
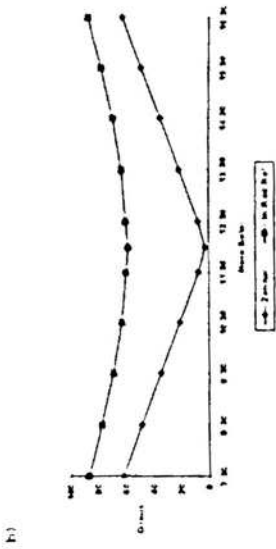
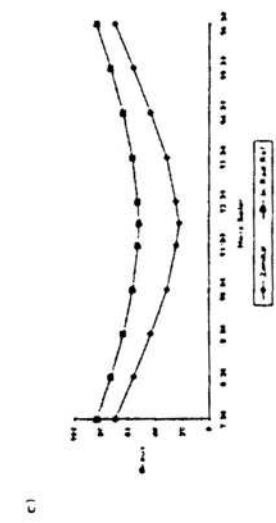
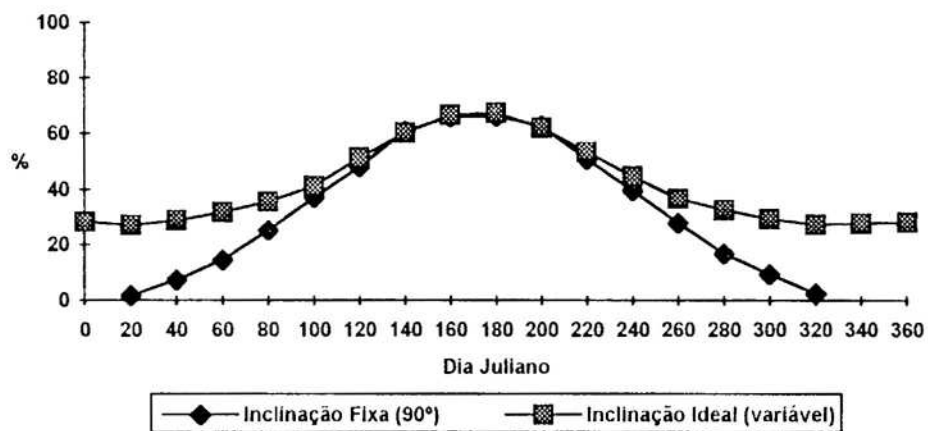
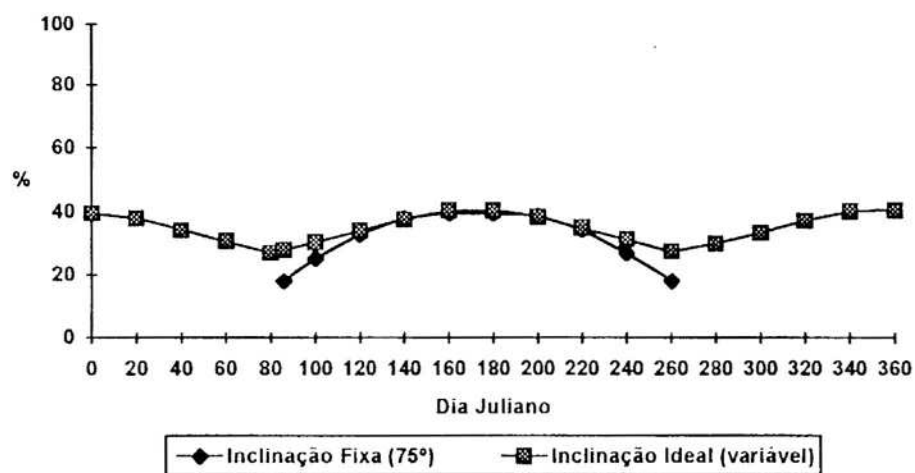


FIGURA 15 - Ganho Percentual de Radiação Solar Direta na Superfície Receptora ao Longo do Ano, para β Fixo e β Ideal, Considerando-se $\overline{LR}=\overline{LC}$, para Diferentes Latitudes e Épocas do Ano: (a) Lat. $20^{\circ}45'$ S - $\overline{CC}=R$ - Refletor Voltado para o Norte; (b) Lat. 0° - $\overline{CC}=R$ - Refletor Voltado para o Norte e (c) Lat. 45° S - $\overline{CC}=R/0,4$ - Refletor Voltado para o Sul.

a)



b)



c)

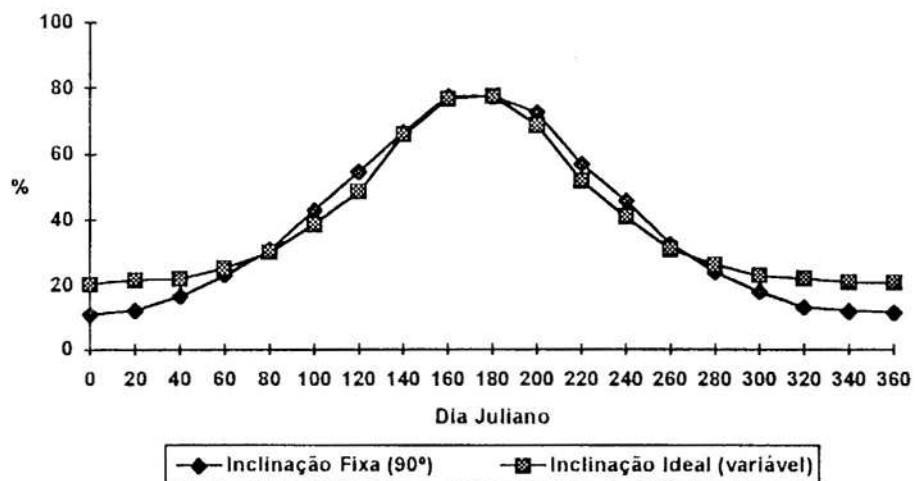
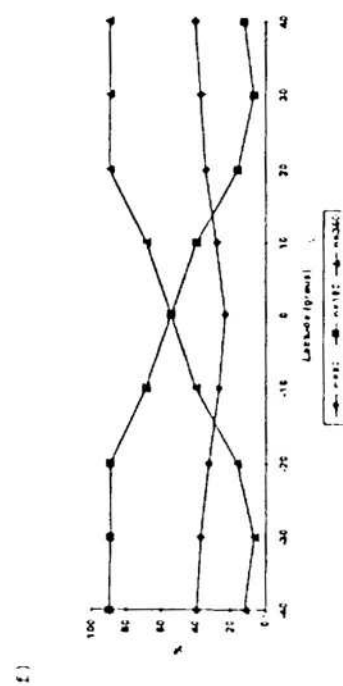
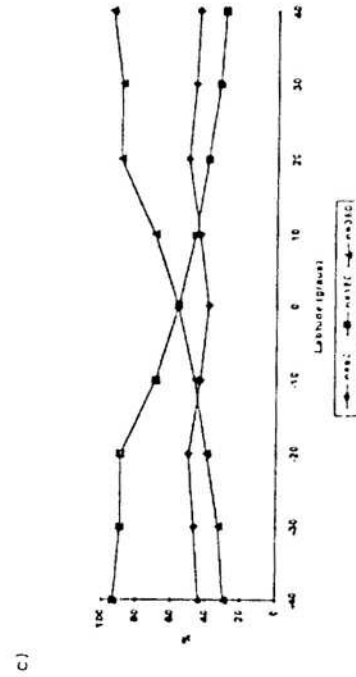
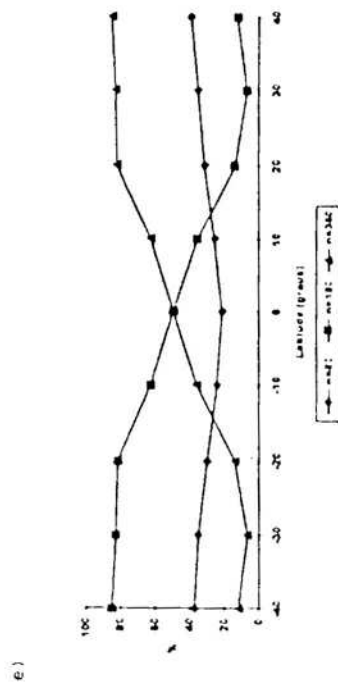
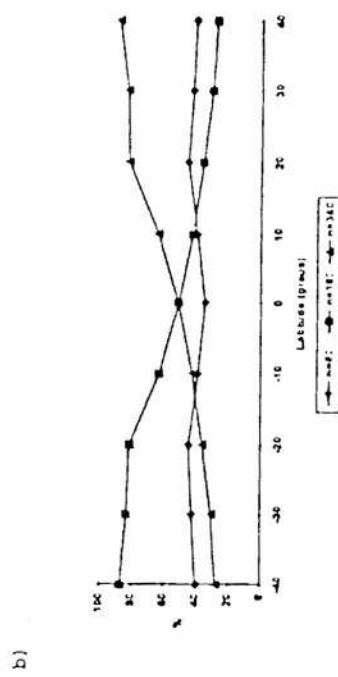
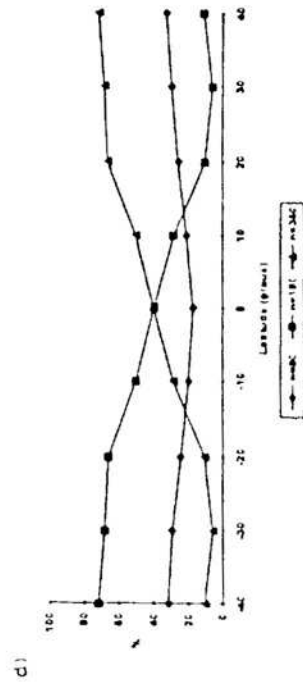
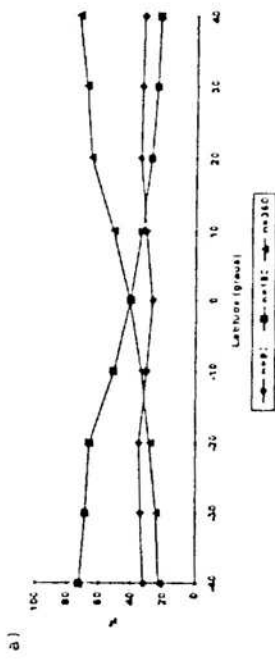


FIGURA 16 - Ganho Percentual de Radiação Solar Direta, pelo Uso de Refletores, para Diferentes Larguras do Refletor, Diferentes Latitudes (Positiva ao Norte e Negativa ao Sul) e Diferentes Épocas do Ano: (a) β Ideal (Diário) - $\overline{LR} = \overline{LC}$; (b) β Ideal (Diário) - $\overline{LR} = 1,5\overline{LC}$; (c) β Ideal (Diário) - $\overline{LR} = 2\overline{LC}$; (d) β Fixo - $\overline{LR} = \overline{LC}$; (e) β Fixo - $\overline{LR} = 1,5\overline{LC}$ e (f) β Fixo - $\overline{LR} = 2\overline{LC}$.



5. RESUMO E CONCLUSÕES

Para determinação do ganho percentual de radiação solar direta em uma superfície horizontal, é necessário conhecer a irradiância solar direta nessa superfície horizontal, o ângulo de incidência do feixe de radiação refletida na mesma superfície, o coeficiente de reflexão do refletor e a área da superfície receptora iluminada pelos raios refletidos.

A determinação quantitativa do ganho de radiação solar direta, em uma superfície horizontal, pode também ser feita mediante a utilização das equações desenvolvidas neste trabalho. Deve-se ressaltar, entretanto, que tais equações se aplicam para dias de céu descoberto, condição para a qual se aplica o modelo utilizado na determinação da irradiância solar direta.

O método desenvolvido no presente trabalho, para determinar o ganho de radiação solar direta em uma superfície horizontal, permite obter ainda a melhor

combinação geométrica do sistema refletor-superfície horizontal, correspondente ao aumento da irradiância solar direta desejado na superfície horizontal receptora.

Verificou-se que os principais parâmetros que afetam o desempenho do sistema são a largura do refletor em relação à da superfície receptora e o ângulo de inclinação desse refletor. Notou-se também que, nas latitudes mais elevadas, além desses parâmetros, a altura do refletor também afeta o desempenho do sistema. Já nas baixas latitudes, observou-se que o fator geométrico predominante para o ganho de radiação solar direta é a largura do refletor, uma vez que a variação da altura deste a partir daquela definida no Apêndice A é pouco significativa em relação ao ganho de radiação solar direta obtido.

O ângulo ótimo de inclinação do refletor varia consideravelmente com a declinação do Sol. Conseqüentemente, ao considerar esta inclinação constante durante todo o ano, concluiu-se que nessas condições, dependendo da diferença entre os ângulos de inclinação fixa e ideal, o refletor fixo pode não proporcionar ganhos satisfatórios de radiação solar direta. Assim, verificou-se que o refletor, se posicionado corretamente, pode proporcionar ganhos substanciais de radiação solar direta incidente na superfície horizontal receptora. Tais ganhos podem-se apresentar muito expressivos e até chegar a valores da ordem de 100% (utilizando-se a altura do refletor definida conforme descrito no Apêndice A), em

alguns horários, em dias de inverno, nas médias e altas latitudes.

Nas latitudes mais elevadas, verificou-se que pequeno aumento na altura do refletor pode proporcionar ganho de radiação solar direta na superfície receptora maior que 100%. Os resultados apresentados mostraram também que, nessas latitudes e no período de inverno, o refletor apresenta-se mais eficiente, por proporcionar ganhos maiores de radiação solar direta em relação às demais épocas do ano, para quaisquer latitudes. Ao contrário, o verão caracteriza-se como o período em que o refletor se mostra menos eficiente durante todo o ano.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- ALMANZA, R.; MUÑOZ, F.; MAZARI, M. Development of aluminum first surface mirrors for solar energy applications. **Solar Energy**, 48:291-295, 1992.
- ALVES, A.R.; VIANELLO, R.L.; SEDIYAMA, G.C.; COELHO, D.T. Determinação analítica dos instantes do "nascer" e "por do Sol" para superfícies inclinadas quaisquer. **Ciência e Cultura**, 35:194-198, 1982.
- BAKER, S.; MCDANIELS, D.K.; KALHN, H.D.; LOWNDES, D.H. Time integrated calculation of the insolation collected by reflector-collector system. **Solar Energy**, 20:415-417, 1978.
- CASAMAJOR, A.B. & PARSONS, R.E. **Design guide for shallow solar ponds**. Livermore, Lawrence Livermore Laboratory, University of California, 1979. 50p.
- CHARLES, D. Developing rations turn to solar power. **New Scientist**, 132:27, 1991
- CHIAM, H.F. Planar concentrators for flat-plate solar collectors. **Solar Energy**, 26:503-509, 1981.
- CHIAM, H.F. Stationary reflector-augmented flat-plate collectors. **Solar Energy**, 29:65-69, 1982.
- CLARK, A.F. & DICKINSON, W.C. **Shallow solar ponds**. In:- **Solar energy technology handbook**. New York, Marcel Dekker, 1980. cap.12 p.377.

- GARG, H.P. & HRISHIKESAN, D.S. Enhancement of solar energy on flat-plate collector by plane booster mirrors. **Solar Energy**, 40:295-307, 1988.
- GRASSIE, S.L. & SHERIDAN, N.R. The use of planar reflectors for increasing the energy yield of flat-plate collectors. **Solar Energy**, 19:663-668, 1977.
- HOLMAN, J.P. **Transferência de Calor**. Trad. Luiz Fernando Milanez. São Paulo, McGraw-Hill, 1983. 639p.
- IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Toronto, Academic Press, 1983. 390p.
- MCDANIELS, D.K.; LOWNDES, D.H.; MATHEW, H.; REYNOLDS, J.; GRAY, R. Enhanced solar energy collection using reflector-solar thermal collector combinations. **Solar Energy**, 17:277-283, 1975.
- NICKLAS, M. Energy politics: can we achieve a sustainable energy path? **Solar Energy**, 50:287-296, 1993.
- PASSOS, F.J.V. **Desempenho de um coletor solar plano e de um concentrador trapezoidal para aquecimento de ar**. Viçosa, MG, UFV, 1981. 84p. (Tese M.S.).
- SEITEL, S.C. Collector performance enhancement with flat reflectors. **Solar Energy**, 17:291-295, 1975.
- TABOR, H. Mirror boosters for solar collectors. **Solar Energy**, 10:111-118, 1966.
- TAHA, I.S. & ELDIGHIDY, S.M. Effect of south orientation on optimum conditions for maximum solar energy absorbed by flat plate collector augmented by plane reflector. **Solar Energy**, 25:373-379, 1980.
- TORRES, C.C. *Problemas de materiais no desenvolvimento de tecnologia da energia solar*. **Bol. Assoc. Bras. Ens. Sup.**, 4/5:43-51, 1980
- VIANELLO, R.L., ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. UFV, Viçosa, MG, Impr. Univ., 1991. 494p.
- WIYEYSUNDERA, N.E. Geometric factors for plane specular reflectors. **Solar Energy**, 20:81-85, 1978.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Determinação das Alturas Máxima e Mínima para o Refletor

a- Determinação da Altura Máxima (R_{\max})

De acordo com o triângulo A'B'C', visto na Figura 1, pode-se verificar que se a inclinação x do refletor for nula (posição vertical) e o ponto C estiver situado exatamente na extremidade da superfície horizontal coletora, a altura do refletor correspondente a esta situação será a altura máxima recomendada, pois qualquer aumento em R implicará um ângulo x negativo. Para que o ponto C, ao meio-dia, esteja na posição indicada, o que proporcionaria o efeito de sombreamento na superfície horizontal ao longo do dia. Logo, a equação 6 se reduz a:

$$\frac{\text{sen } (Z_{12})}{\text{sen } (90^\circ - Z_{12})} = \frac{\overline{CC}}{R_{\max}} \quad (84)$$

Assim sendo

$$R_{\max} = \overline{CC} \operatorname{tg}(Z_{12}) \quad . \quad (85)$$

b- Determinação da Altura Mínima (R_{\min})

Considerando ainda o triângulo ABC da Figura 1, verifica-se que a existência de reflexão dos raios solares na direção da superfície horizontal implica necessariamente a relação $[(90^\circ - 2x - Z_{12}) > 0^\circ]$, ou $(\hat{\alpha} > 0^\circ)$. Portanto, a inclinação x do refletor deverá ser menor que $[(90^\circ - Z_{12})/2]$.

R_{\min} foi definido com o auxílio de um programa computacional onde a equação 6 foi utilizada, testando-se valores de R partindo-se do valor máximo calculado pela equação 85. Aos valores de R testados no programa, subtraiu-se 0,01m em relação ao anterior. Para cada valor de R testado, foi verificada a existência da condição $[(x < (90^\circ - Z_{12})/2)]$, até identificar-se o último valor de R que torne esta condição verdadeira. Desta forma obteve-se o valor de R_{\min}

APÊNDICE B

QUADRO 1A - Ângulo de Inclinação Ideal do Refletor (β) para o Brasil (latitudes de 5°N a 35°S), Considerando a Altura do Refletor Igual ao Comprimento da Superfície Coletora

Dia Juliano (n)	Latitudes								
	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35
15(15/01)	77,6	74,3	70,9	67,6	64,3	60,9	62,6	65,9	69,3
30(30/01)	75,5	72,1	68,8	65,5	62,1	61,4	64,7	68,1	71,4
45(14/02)	72,5	69,2	65,8	62,5	61,0	64,3	67,7	71,0	74,4
60(01/03)	68,9	65,6	62,3	61,2	64,6	67,9	71,2	74,6	77,9
75(16/03)	65,1	61,7	61,8	65,2	68,5	71,8	75,2	78,5	81,9
90(31/03)	61,1	62,5	65,8	69,2	72,5	75,9	79,2	82,6	85,9
105(15/04)	63,1	66,4	69,7	73,1	76,4	79,7	83,1	86,4	89,9
120(30/04)	66,5	69,8	73,2	76,5	79,9	83,2	86,5	89,9	92,9
135(15/05)	69,3	72,6	76,0	79,3	82,7	86,1	89,4	92,3	95,7
150(30/05)	71,3	74,6	77,9	81,3	84,7	88,0	90,9	94,3	97,6
165(14/06)	72,3	75,6	79,0	82,3	85,7	89,0	91,9	95,3	98,6
180(29/06)	72,3	75,6	78,9	82,3	85,7	89,0	91,9	95,3	98,6
195(14/07)	71,2	74,6	77,9	81,3	84,6	87,9	90,9	94,2	97,6
210(29/07)	69,2	72,6	75,9	79,3	82,6	85,9	89,3	92,2	95,6
225(13/08)	66,4	69,7	73,1	76,4	79,8	83,1	86,4	89,8	92,7
240(28/08)	62,9	66,3	69,6	73,0	76,3	79,6	82,9	86,3	89,7
255(12/09)	61,1	62,4	65,7	69,1	72,4	75,7	79,1	82,4	85,8
270(27/09)	65,2	61,9	61,7	65,1	68,4	71,7	75,1	78,4	81,8
285(12/10)	69,1	65,8	62,4	61,1	64,4	67,8	71,1	74,5	77,8
300(27/10)	72,6	69,3	65,9	62,6	60,9	64,2	67,6	70,9	74,3
315(12/11)	75,5	72,2	68,9	65,6	62,2	61,3	64,6	68,0	71,3
330(27/11)	77,7	73,4	71,1	67,7	64,3	61,0	62,5	65,9	69,2
345(11/12)	78,9	75,6	72,2	68,9	65,5	62,2	61,3	64,7	68,0
360(26/12)	79,1	75,7	72,4	69,0	65,7	62,3	61,2	64,5	67,9

QUADRO 2A - Ganho Diário de Radiação Solar Direta (%) Pelo uso de um Refletor(*) Solar com Inclinação Ideal β , ao Longo do Ano, para o Brasil (latitudes de 5°N a 35°S), Considerando a Altura do Refletor Igual ao Comprimento da Superfície Coletora

Dia Juliano (n)	Latitudes								
	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35
15(15/01)	43,0	38,3	35,3	32,3	29,8	27,6	27,9	29,6	31,5
30(30/01)	39,9	36,3	33,2	30,6	28,4	27,5	29,1	30,9	33,1
45(14/02)	36,4	33,4	30,8	28,7	27,5	29,1	30,7	33,1	35,5
60(01/03)	33,1	30,7	28,6	27,8	29,5	31,4	33,7	36,3	39,5
75(16/03)	29,5	27,7	27,7	29,4	31,4	33,8	36,6	39,9	43,8
90(31/03)	26,0	28,1	30,0	32,2	34,8	37,8	41,4	45,6	50,6
105(15/04)	29,0	31,2	33,7	36,6	40,1	44,3	49,3	52,2	61,2
120(30/04)	31,3	34,0	37,1	40,8	45,2	50,6	57,2	65,5	75,3
135(15/05)	33,7	36,8	40,6	45,1	50,5	57,2	65,5	75,2	88,8
150(30/05)	35,7	39,2	43,5	48,6	54,9	62,8	71,8	84,3	101,3
165(14/06)	36,8	40,6	45,2	50,7	57,5	66,0	75,9	89,7	110,4
180(29/06)	36,7	40,6	45,1	50,6	57,5	65,9	75,9	89,6	110,2
195(14/07)	35,6	39,2	43,4	48,5	54,8	62,6	71,6	84,1	100,9
210(29/07)	33,6	36,7	40,4	44,9	50,3	59,9	65,2	74,9	88,3
225(13/08)	31,3	33,9	37,0	40,6	45,0	50,4	56,9	65,2	74,9
240(28/08)	28,9	31,1	33,6	36,5	39,9	44,1	49,1	52,0	60,6
255(12/09)	27,3	28,0	30,0	32,1	34,7	37,7	41,2	45,4	50,4
270(27/09)	29,6	27,7	27,6	29,3	31,3	33,7	36,5	39,7	43,6
285(12/10)	33,1	30,7	28,7	27,7	29,4	31,3	33,6	36,2	39,3
300(27/10)	36,5	33,5	30,9	28,7	27,5	29,1	30,9	33,0	35,5
315(12/11)	40,0	36,4	33,3	30,7	28,4	27,5	29,1	30,9	33,0
330(27/11)	43,1	38,9	35,4	32,4	29,9	27,7	28,0	29,6	31,5
345(11/12)	45,0	40,4	36,7	33,5	30,7	28,4	27,4	28,9	30,7
360(26/12)	45,3	40,7	36,9	33,6	30,9	28,5	27,3	28,9	30,6

* Reflectância 100%

QUADRO 3A - Ganho Diário de Radiação Solar Direta (%) Pelo uso de um Refletor(*) Solar com Inclinação β Fixa Definida como sendo a Inclinação Ideal do Refletor para o Período de Inverno (Quadro 1), ao Longo do Ano, para o Brasil (latitudes de 5°N a 35°S), Considerando a Altura do Refletor Igual ao Comprimento da Superfície Coletora

Dia Juliano (n)	Latitudes								
	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35
15(15/01)	32.5	39.3	32.9	25.5	16.8	07.4	04.2	12.2	19.8
30(30/01)	34.4	36.2	29.2	21.4	12.3	03.4	05.7	09.3	15.1
45(14/02)	36.1	31.8	24.1	15.6	6.3	08.7	10.0	12.7	15.8
60(01/03)	31.6	25.6	17.6	10.4	12.5	13.5	16.3	18.9	21.9
75(16/03)	26.4	19.0	15.3	17.4	19.0	21.4	24.6	27.7	31.3
90(31/03)	18.5	20.4	22.4	24.7	27.3	30.3	34.9	38.2	43.1
105(15/04)	24.6	26.8	29.2	32.0	35.2	39.0	43.9	50.0	59.6
120(30/04)	30.1	32.8	35.9	38.2	42.2	47.2	56.1	64.5	75.1
135(15/05)	33.8	36.9	40.7	45.2	50.7	57.4	66.0	76.7	90.6
150(30/05)	36.1	39.7	44.0	49.2	55.5	63.4	73.1	85.9	103.3
165(14/06)	36.8	40.6	45.2	50.7	57.5	66.0	75.9	89.7	110.4
180(29/06)	36.7	40.6	45.1	50.6	57.5	65.9	75.9	89.6	110.2
195(14/07)	36.1	39.6	43.9	49.1	55.4	63.3	72.9	85.7	103.0
210(29/07)	33.7	36.9	40.5	45.0	50.5	57.2	65.7	76.3	90.1
225(13/08)	30.0	32.6	35.7	38.1	41.9	46.9	55.6	64.1	74.6
240(28/08)	24.4	26.6	29.0	31.8	34.9	38.7	43.6	49.5	58.7
255(12/09)	26.8	20.2	22.2	24.5	27.0	30.0	33.8	37.8	42.6
270(27/09)	26.6	19.3	15.7	17.1	19.2	21.2	24.3	27.3	30.9
285(12/10)	31.7	25.8	17.8	10.1	12.2	14.5	16.1	18.6	21.6
300(27/10)	36.0	32.0	24.2	15.8	06.1	08.4	09.8	12.5	15.6
315(12/11)	34.3	36.3	29.4	21.5	12.5	03.2	05.6	09.3	15.2
330(27/11)	32.4	39.4	33.0	25.6	16.9	07.6	04.3	12.3	19.9
345(11/12)	31.2	40.5	35.9	27.9	19.3	10.0	06.9	15.1	22.8
360(26/12)	31.0	40.5	36.2	28.2	19.6	10.3	06.8	15.5	23.1

* Reflectância 100%

QUADRO 4A - Dias julianos (n) correspondentes às datas
(dia/mês) durante todo o ano

d/m	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
01	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335
02	2	33	61	92	122	153	183	214	245	275	306	336
03	3	34	62	93	123	154	184	215	246	276	307	337
04	4	35	63	94	124	155	185	216	247	277	308	338
05	5	36	64	95	125	156	186	217	248	278	309	339
06	6	37	65	96	126	157	187	218	249	279	310	340
07	7	38	66	97	127	158	188	219	250	280	311	341
08	8	39	67	98	128	159	189	220	251	281	312	342
09	9	40	68	99	129	160	190	221	252	282	313	343
10	10	41	69	100	130	161	191	222	253	283	314	344
11	11	42	70	101	131	162	192	223	254	284	315	345
12	12	43	71	102	132	163	193	224	255	285	316	346
13	13	44	72	103	133	164	194	225	256	286	317	347
14	14	45	73	104	134	165	195	226	257	287	318	348
15	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
16	16	47	75	106	136	167	197	228	259	289	320	350
17	17	48	76	107	137	168	198	229	260	290	321	351
18	18	49	77	108	138	169	199	230	261	291	322	352
19	19	50	78	109	139	170	200	231	262	292	323	353
20	20	51	79	110	140	171	201	232	263	293	324	354
21	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
22	22	53	81	112	142	173	203	234	265	295	326	356
23	23	54	82	113	143	174	204	235	266	296	327	357
24	24	55	83	114	144	175	205	236	267	297	328	358
25	25	56	84	115	145	176	206	237	268	298	329	359
26	26	57	85	116	146	177	207	238	269	299	330	360
27	27	58	86	117	147	178	208	239	270	300	331	361
28	28	59	87	118	148	179	209	240	271	301	332	362
29	29		88	119	149	180	210	241	272	302	333	363
30	30		89	120	150	181	211	242	273	303	334	364
31	31		90		151		212	243		304		365