

EDINEI CANUTO PAIVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR SOLAR MICROCONTROLADO
PARA UM COLETOR SOLAR CONCENTRADOR**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

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

T

P149d
2009

Paiva, Edinei Canuto, 1978-

Desenvolvimento de um rastreador solar microcontrolado
para um coletor solar concentrador / Edinei Canuto Paiva.

– Viçosa, MG, 2009.

xvi, 111f.: il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Adílio Flauzino de Lacerda Filho.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Coletores solar. 2. Energia solar. 3. Microcontroladores.
4. Radiação solar. I. Universidade Federal de Viçosa.

II. Título.

CDD 22.ed. 621.47

EDINEI CANUTO PAIVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM RASTREADOR SOLAR MICROCONTROLADO
PARA UM COLETOR SOLAR CONCENTRADOR**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

APROVADA: 18 de maio de 2009

Prof. Paulo Marcos de Barros Monteiro

Prof. Delly Oliveira Filho
(Co- orientador)

Prof. Sukarno Olavo Ferreira

Prof. Jadir de Oliveira Filho

Prof. Adílio Flauzino de Lacerda Filho
(Orientador)

aos meus irmãos e à minha mãe
às minhas filhas Carolina, Laura e à minha esposa;
ao meu pai Roberto Antônio de Paiva[†] (31/10/1947 à 06/03/2008)
à minha irmã Erce Canuto Paiva[†] (17/12/1970 à 15/09/2008)

Agradecimentos

Primeiro agradeço a Deus pela oportunidade que me foi dada, agradeço à Universidade Federal de Viçosa (UFV), berço de grande parte da minha vida acadêmica, à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Agradeço a minha esposa Celimar, pelo seu apoio, paciência e incentivo, fundamental naqueles dias em que nada parecia funcionar.

Ao meu orientador, Professor Adílio Flauzino de Lacerda Filho, por sua paciência, atenção e ensinamentos transmitidos durante o desenvolvimento deste trabalho e mais ainda por ter me confiado a responsabilidade deste trabalho, respeitando o tempo que precisei.

Aos colegas do departamento, Carlos André da Costa, Cassandra, Hamilton e muitos outros não citados aqui; agradeço também à estagiária Lígia Serrano pela ajuda e amizade.

Ao Carlos Pintinho, pelas sugestões na mecânica do coletor solar e por sua amizade.

Ao meu amigo Adalberto, pela amizade e as horas dedicadas ao projeto, até tarde da noite também em fins de semana e pelo desenvolvimento do software para microcontrolador.

Aos irmãos amados, Roberto, Kátia, Elenice, Erce[†], Edna e Edson.

Agradeço à minha mãe, que nesta jornada me dedica tanto amor e carinho.

Agradeço ao Nicolas Lancaster, pelo apoio na construção da calha refletora e placas de circuito.

E também agradeço ao meu falecido pai, Sr Roberto, que sempre me deu incentivo para que eu nunca desistisse mesmo nos momentos em que ele se viu convalescente se colocou firme.

Índice

Lista de Símbolos	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Quadros	xiv
Resumo	xv
Abstract	xvi
Introdução geral	1
Bibliografia	4
Objetivos	5
CAPÍTULO 1	6
1 O rastreador	6
1.1 Introdução	6
1.2 Revisão de literatura	6
1.2.1 O seguidor solar	9
1.2.2 Tipos de seguidores solares	9
1.2.3 Movimento sobre eixo horizontal orientado na direção leste-oeste	10
1.2.4 Movimento sobre eixo horizontal orientado na direção norte-sul	11
1.2.5 Seguidor polar (um eixo móvel norte-sul)	13
1.2.6 Seguidor com eixo vertical móvel (azimutal)	14
1.2.7 Seguidor com movimento sob dois eixos	15
1.3 Posicionamento de equipamentos de seguimento solar	16
1.4 Objetivos	17
1.5 Material e métodos	17
1.6 Resultados e discussão	24
1.7 Análises de custos	27
1.8 Conclusões	28

1.9 Bibliografia	29
CAPÍTULO 2	31
2 Energia fotovoltaica	31
2.1 Introdução	31
2.2 Revisão de literatura	31
2.2.1 Efeito fotoelétrico	31
2.2.2 Características elétricas dos módulos fotovoltaicos	34
2.3 Objetivos	37
2.4 Material e métodos	38
2.5 Resultados e discussão	44
2.6 Análise econômica	50
2.7 Conclusões	51
2.8 Bibliografia	52
CAPÍTULO 3	53
3 Coletor solar concentrador	53
3.1 Introdução	53
3.2 Revisão de literatura	55
3.2.1 Coletores concentradores	55
3.2.2. Razão de concentração	56
3.2.3. Desempenho térmico de coletores concentradores	61
3.2.4. Desempenho térmico do receptor	62
3.3 Objetivos	68
3.4 Material e métodos	69
3.4.1 Montagem do coletor	69
3.5 Resultados e discussão	74
3. 6 Análise econômica	82
3.6.1 Valor presente líquido (VPL)	83

3.6.2 Relação benefício-custo (B/C);	85
3.6.3 Taxa interna de retorno (TIR).	85
3.7 Conclusões	87
3.8 Bibliografia	88
Conclusões gerais	90
CAPÍTULO 4	91
Apêndice A	91
4.1 A energia solar	91
4.1.1 A constante solar	92
4.1.2 Espectro solar extra terrestre	93
4.1.3 Irradiância solar extraterrestre	93
4.2 Características da radiação solar ao nível do solo	101
4.2.1 Radiação direta sobre uma superfície em movimento	101
4.3 Bibliografia	103
CAPÍTULO 5	104
Apêndice B	104
5.1 Radiação global sobre superfícies e simulações	104
5.2 Resultado das simulações	106
5.3 Bibliografia	109

Lista de Símbolos

- A_a - área de abertura do coletor (m^2)
 A_r - área do absorvedor de radiação (m^2)
 C - razão de concentração (adimensional)
 r - raio do receptor (m)
 r_{ss} - raio do Sol (m)
 R - distância Terra-Sol (m)
 θ_{ss} - semi-ângulo subtendido pelo disco solar ($^\circ$)
 r_c - distância entre o foco e um ponto qualquer da superfície refletora (m)
 r_{cf} - raio máximo da calha refletora (m)
 ζ_c - semi-ângulo de abertura de um concentrador cilíndrico ($^\circ$)
 W - largura de um receptor plano (m)
 f - distância focal (m)
 ζ - é o ângulo entre os segmentos foco-vértice e r_c ($^\circ$)
 δ_r - abertura angular causada pela reflexão ($^\circ$)
 $l(w)$ - intensidade de radiação sobre o receptor em função da distância ao centro da área focal w
 S - radiação absorvida por unidade de área e de tempo (W/m^2)
 I_d - irradiância solar direta (W/m^2)
 I_e - irradiância solar difusa (W/m^2)
 ρ_c - refletância especular (adimensional)
 Γ - fator de interceptação (adimensional)
 α_c - absorvância do receptor (adimensional)
 U_L - coeficiente de perda térmica (adimensional)
 F_R - fator de remoção térmica (adimensional)
 F' - fator de eficiência (adimensional)
 h_w - coeficiente de perda por convecção (W/m^2K)
 h_r - coeficiente de perda térmica por radiação (W/m^2K)
 U_{cond} - coeficiente de perda térmica por condução (W/m^2K)
 \bar{T} - temperatura média do tubo absorvedor (receptor) (K)
 ε - emitância da superfície do absorvedor (adimensional)
 σ - constante de Boltzmann (J/K)
 V_{ar} - velocidade do ar (m/s)
 $Q_{s \rightarrow r}$ - taxa com que a energia solar chega ao receptor (W/m^2)
 T_s - temperatura da fotosfera (K)
 $E_{r \rightarrow s}$ - fração de energia emitida de volta ao sol (W/m^2)
 T_r - temperatura do absorvedor (K)
 U_o - coeficiente de transferência de calor (W/m^2K)
 D_i - diâmetro interno do absorvedor (m)
 D_o - diâmetro externo do absorvedor (m)

h_{fi} - coeficiente de transferência de calor para o interior do tubo (adimensional)
 k - condutividade térmica do tubo (W/mK)
 q'_u - ganho de energia útil por unidade de comprimento do coletor (W/m)
 L - comprimento do receptor (m)
 T_r - temperatura local do receptor (K)
 T_a - temperatura ambiente (K)
 F'' - fator de fluxo térmico (adimensional)
 \dot{m} - vazão mássica de fluido (kg/s)
 C_p - calor específico do fluido (J/kg.K)
 $T_{f,i}$ - temperatura do fluido na entrada do absorvedor (K)
 $T_{f,o}$ - temperatura do fluido na saída do tubo absorvedor (K)
 η_t - rendimento teórico do coletor (adimensional)
 η_c - rendimento experimental do coletor (adimensional)
 I_G - irradiância solar global (W/m²)
 Q_{UTIL} - energia útil adquirida pelo fluido (J)
 \dot{M} - vazão mássica de vapor (kg/s)
 L_V - calor latente de vaporização (J/kg)
 Q_L - energia perdida pelo coletor (J)
 τ_r - transmitância do revestimento do receptor (adimensional)
 T_f - temperatura local do fluido (K)
 c_t - custos de investimento e operação (R\$)
 t - tempo (em anos)
 b_t - benefícios gerados por um investimento (R\$)
 VPL - Valor Presente Líquido (R\$)
 d - taxa de desconto (taxa de juros)
 B/C - relação benefício custo (adimensional)
 TIR - taxa interna de retorno (%)
 V_{oc} - tensão no circuito aberto (V)
 I_{cc} - corrente de curto-circuito (A)
 P_{max} - potência máxima do painel fotovoltaico (W)
 V_{mP} - tensão máxima de pico (V)
 I_{mP} - corrente máxima de pico (A)
 η_f - rendimento do painel fotovoltaico (adimensional)
 I_o - corrente que é fornecida à carga (A)
 I_{fg} - corrente fotogerada (A)
 I_{dd} - corrente no diodo de proteção (A)
 I_{sr} - corrente de saturação reversa do diodo (A)
 V_d - tensão nos terminais da junção pn (V)
 q - carga elementar (C)
 T_c - temperatura da célula fotovoltaica (K)

I_{sro} - corrente de saturação reversa na temperatura T_{rf} (A)
 T_{rf} - temperatura de referência, em kelvin (normalmente 298 K)
 E_{go} - diferença de potencial do silício (1,1 V)
 T_{cf} -
 V - Tensão fotogerada (V)
 ΔV_1 - desvio na medida da tensão no resistor (V)
 V_1 - tensão no resistor de precisão (V)
 R_o - resistência do resistor de precisão (Ω)
 P - potência fornecida pelo painel à carga (W)
 I - intensidade da corrente elétrica medida (A)
 ΔI - desvio na medida da corrente (A)
 ΔR_o - erro do resistor, $\pm 0,0066 \Omega$
 P_{medida} - potência calculada através de dados medidos (W)
 ΔP - desvio da potência (W)
 N - reta normal a superfície
 s - reta que liga terra-sol
 z - zênite
 θ_z - ângulo zenital ($^\circ$)
 θ_s - ângulo entre a radiação direta e a normal à superfície ($^\circ$)
 \mathcal{R} - reta de referência paralela ao plano horizonte local
 β - ângulo de inclinação da superfície ($^\circ$)
 α - elevação solar ($^\circ$)
 γ - azimute da superfície ($^\circ$)
 γ_s - azimute solar ($^\circ$)
 ω - ângulo horário ($^\circ$)
 ϕ - latitude local ($^\circ$)
 V_s - tensão de saída no divisor de tensão (V)
 R_f - resistência de valor fixo (Ω)
 R_v - resistência variável (Ω)
 V_e - tensão de entrada no divisor de tensão (V)
 R_a - resistência ajustável (Ω)
 $\check{S}1$ – sensor de radiação
 $\check{S}2$ – sensor de radiação
 $\check{S}3$ – sensor de radiação
 $\check{S}4$ – sensor de radiação
 I_{ff} - irradiância na fotosfera (W/m^2)
 I_{bo} - irradiância no topo da atmosfera (W/m^2)
 $I_{bo,n}$ - irradiância no topo da atmosfera sobre uma superfície normal à radiação direta (W/m^2)
 n_j - dia Juliano
 τ_h - transmitância atmosférica (adimensional)
 $I_{bo,h}$ - irradiância solar sobre uma superfície horizontal (W/m^2)

m - massa de ar, caminho ótico (adimensional)

$H_{o,h}$ - Radiação solar sobre uma superfície horizontal (J/m^2)

ω_s - ângulo horário no por do sol ($^\circ$)

\bar{r} - distância média terra-sol (m)

τ_{hv} - transmitância atmosférica citada por VIANELLO, 1991 (adimensional)

R_g - Radiação global sobre uma superfície (J/m^2)

Lista de Figuras

Figura 1.1: Seguidor com eixo horizontal leste-oeste.	10
Figura 1.2: Seguidor com eixo horizontal sul-norte.	12
Figura 1.3: Coletor rastreador desenvolvido por POULEK.	13
Figura 1.4: Seguidor eixo vertical móvel.	14
Figura 1.5: Seguidor solar, eixo vertical e horizontal móvel.	15
Figura 1.6: Cremalheira modificada para movimento em torno de eixo horizontal.	18
Figura 1.7: Cremalheira e motor de movimentação sobre eixo vertical.	19
Figura 1.8: Placa de circuito.	20
Figura 1.9: a) disposição dos sensores; b) sensor Š1 sombreado c) sensor Š2 sombreado.	22
Figura 1.10: Divisor de tensão do sensor.	22
Figura 1.11: Conjunto de sensores no interior do tubo.	25
Figura 1.12: Gráficos de radiação solar durante alguns dias de experimento. .	25
Figura 1.13: Monitoração de uso do motor.	26
Figura 2.1: Características de uma curva Corrente x Tensão em painéis fotovoltaicos. Fonte ASTM.	33
Figura 2.2: Ponto de máxima potência. Adaptado de LIM & HAMILL, 2000.	34
Figura 2.3: Circuito equivalente de um painel fotovoltaico.	36
Figura 2.4: Painel fotovoltaico móvel preso ao coletor concentrador.	39
Figura 2.5: Detalhes da montagem do experimento.	41
Figura 2.6: Razão entre as potências dos painéis Fixo e Móvel, para o dia 23 de maio de 2008.	45
Figura 2.7: Potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos em 24 de maio, 2008.	46
Figura 2.8: Razão entre as potências dos painéis fixo e móvel para o dia 25 de maio de 2008.	46
Figura 2.9: Razão entre as potências dos painéis fixo e móvel para o dia 03 de junho de 2008.	47

Figura 2.10: Razão entre as potências dos painéis fixo e móvel para o dia 07 de junho de 2008.	48
Figura 2.11: Intensidade de radiação global sobre uma superfície horizontal, painel fixo e painel móvel no dia 24/05/2008.	49
Figura 3.1 Representação esquemática do sol a uma temperatura T_s , a uma distancia R do concentrador de área A_a e receptor de área A_r . Adaptado de Rabl (1976).	57
Figura 3.2: (a) Secção de um concentrador de foco linear, (b) Dimensões da imagem.	58
Figura 3.3: Esquema de um concentrador com ângulo de dispersão δ_r	59
Figura 3.4: Distribuição da radiação de um refletor cilíndrico sobre um receptor de largura AB.	60
Figura 3.5: Balanço de energia sobre o fluído sem mudança de fase.	66
Figura 3.6: Estrutura construída em metalon e barras chatas, que será usada na montagem do coletor.	69
Figura 3.7: Curva de uma função qualquer no plano cartesiano.	70
Figura 3.8: Esboço de parábola com foco de 20 cm.	71
Figura 3.9: Esboço de um concentrador cilindro-parabólico.	72
Figura 3.10: Tubo de cobre enegrecido.	72
Figura 3.11: Sistema, calha cilindro-parabólica com painel fotovoltaico acoplados ao rastreador.	73
Figura 3.12: Rendimentos η_g e η_e e suas respectivas regressões lineares.	76
Figura 3.13: Rendimento global no dia 24 de maio e regressão linear.	77
Figura 3.14: Rendimento global no dia 25 de maio e regressão linear.	78
Figura 3.15: Rendimento global no dia 04 de junho e regressão linear.	79
Figura 3.16: Rendimento global no dia 07 de junho e regressão linear.	79
Figura 3.17: Temperatura instantânea da água na saída do sistema, 23 a 25 de maio, 04 e 07 de junho de 2008.	80
Figura 3.18: Radiação global nos dias 24 de maio e 04 de junho.	81
Figura 3.19: Eficiência em função da temperatura de saída da água.	81
Figura 4.1: Divergente de energia a partir do sol até a terra.	92

Figura 4.2: O efeito cosseno e a irradiância extraterrestre	95
Figura 4.3: Azimute, ângulo de incidência e ângulo de inclinação do plano.	97
Figura 4.4: Variação sazonal da radiação solar extraterrestre diária incidente sobre uma superfície horizontal fora da atmosfera terrestre. Adaptado de (STINE & GEYER, 2001).	99
Figura 4.5: Variação sazonal da radiação solar extraterrestre diária incidente sobre uma superfície colocada normal aos raios solares, fora da atmosfera terrestre. Retirado de (STINE & GEYER, 2001).	100
Figura 4.6: Absorção e espalhamento da energia solar incidente na atmosfera. Valores típicos para uma massa de ar.....	101
Figura 5.1: Simulação a radiação solar sobre superfícies horizontais fixas e superfícies inclinadas fixas para as latitudes 0°, 10°, 20°, 30° e 40°.....	106
Figura 5.2: Radiação solar sobre superfícies moveis para um e dois graus de liberdade.	107
Figura 5.3: Diferença entre gráficos da figura 5.1 e 5.2.	108

Lista de Quadros

Quadro 1-1: Componentes eletrônicos e equipamentos utilizados no rastreador.	21
Quadro 1-2: Componentes eletroeletrônicos e materiais usados no rastreador.	27
Quadro 2-1: Lista de equipamentos de sensores usados na coleta de dados..	39
Quadro 2-2: Características nominais do módulo KC60. Fonte: http://kyocerasolar.com.br/site/pdfs/KC60_br.pdf	40
Quadro 3-1: Valor médio da velocidade do vento, da radiação solar, das temperaturas ambiente e do fluido na entrada e na saída do sistema.....	75
Quadro 3-2: Energia útil absorvida e rendimento global.	76
Quadro 3-3: Investimento de execução e manutenção do sistema.	84

Resumo

PAIVA, Edinei Canuto, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2009.
Desenvolvimento de um rastreador solar microcontrolado para um coletor solar concentrador. Orientador: Adílio Flauzino de Lacerda Filho Co-orientadores: Aristides Ribeiro e Delly Oliveira Filho.

Este trabalho foi realizado com o objetivo de construir um coletor solar concentrador, para ser usado na produção de água destilada, dotado de um sistema de orientação automático capaz de fazer o rastreamento do sol e estudar efeitos do rastreamento sobre painéis fotovoltaicos. Optou-se por construir um coletor concentrador de foco linear, com razão de concentração igual a 27, acoplado a um sistema rastreador capaz de localizar as regiões de maior radiação no céu. O rastreador microcontrolado, foi feito com o microcontrolador da Microchip PIC 16F877 utilizando quatro LDRs (Light Depending Resistor,) como sensores de radiação. Concluída esta primeira parte foi feita uma avaliação energética, a fim de determinar a eficiência de conversão energética e, por fim, fez-se uma avaliação de painéis fotovoltaicos rastreadores e estes mostraram um aumento médio na eficiência de até 70% em relação a painéis fixos. A análise técnica e de custos mostraram a viabilidade econômica e técnica do rastreador projetado.

Abstract

PAIVA, Edinei Canuto, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May of 2009.
Development of a tracker for concentrator solar collector. Adviser: Adílio Flauzino de Lacerda Filho Co-advisers: Delly Oliveira Filho and Aristides Ribeiro.

This work was carried out with the objective of building a solar collector concentrator endowed of an automatic system of direction to be used in the production of distilled water and to do the tracking with photovoltaic panels. A collector was opted to build concentrator of linear focus, with reason of equal concentration to 27 coupled to a system tracker ably to locate the clearest regions in the sky. The micro controlled tracking, able to locate clearer regions in the sky was done by the electronic component of the Microchip (PIC 16F877) using four LDRs (Light Depending Resistor,) like sensors of radiation. When this first part was ended an energetic evaluation was done, in order to determine the efficiency of energetic conversion and, finally, an evaluation of photovoltaic panels was made a trackers and these showed a middle increase in the efficiency of up to 70 % regarding fixed panels. The analysis technical and of costs they showed the economical and technical viability of the tracker projected.

Introdução geral

Diversos países estão investindo de forma intensiva em fontes renováveis de energia incluindo a energia solar, térmica e fotovoltaica, investigando desde as características do fluxo de radiação solar que chega à Terra até a tecnologia necessária para viabilizar, em termos técnicos e econômicos, o aproveitamento dessa energia.

O interesse pela utilização da radiação solar como fonte de energia alternativa cresceu nas últimas décadas por razões econômicas, principalmente após a crise do petróleo de 1973, quando os estudos nessa área receberam grande impulso nos Estados Unidos e na Europa. Hoje, esse interesse está adquirindo maior dimensão, abrangendo não só o aproveitamento da radiação como fonte de energia limpa e renovável mas também o conhecimento do clima e de suas mudanças, como uma questão crucial, que envolve a própria manutenção da vida na Terra (CEPEL, 2004).

Por suas características tropicais, o Brasil tem, em quase todo o território e durante o ano inteiro, grande potencial de oferta de energia solar. Enquanto nos países de clima temperado o pico de uso da energia elétrica ocorre no inverno, exatamente quando a insolação é mínima, no Brasil acontece o contrário, o que aumenta a atratividade do uso da energia solar (COLLE & PEREIRA, 1998; TIBA, 2000).

Pode-se dizer que em longo prazo, a energia solar poderá trazer benefícios para o país, pelo fato de ser renovável e por colaborar na despoluição de áreas urbanas e diminuir a dependência em relação ao petróleo (COLLE & PEREIRA, 1997).

A radiação solar é distribuída de forma mais uniforme que a biomassa ou mesmo os ventos, o que dá maiores possibilidades de aproveitamento. Outra característica, no aspecto econômico, é o fato de que esta fonte minimiza custos operacionais, uma vez que os dispêndios no item “combustível” não existem. A experiência mostra que sistemas bem geridos podem minimizar custos de manutenção.

A tecnologia de energia solar concentrada possibilita o acúmulo de energia provinda do sol sobre um receptor. Com isso, o sistema opera numa

faixa de temperatura superior a de coletores planos, em torno de 100 °C a 500 °C. No entanto, pouco é feito para aproveitar essa energia. De acordo com concepção amplamente difundida, o uso de energia solar é associado com a produção da eletricidade ou energia térmica de baixa temperatura, principalmente para finalidades domésticas. Este ponto de vista negligência o grande potencial em fornecer eficientemente a energia térmica em uma escala de temperatura de até 250 °C, energia necessária em aplicações industriais ou municipais. Os exemplos típicos são indústrias de gêneros alimentícios, têxtil e de papel, setor automobilístico, institutos de beleza (bronzamento), cura de materiais de edificação, secagem de produtos agrícolas, aquecimento e refrigeração de grandes complexos (hotéis, shopping centers etc). Esta demanda significativa não pode ser satisfeita por outra fonte renovável de energia com exceção das instalações onde a biomassa ou a energia geotérmica está abundantemente disponível (KARL-HEINZ et al, 1999).

Muitos laboratórios da Universidade Federal de Viçosa utilizam água destilada na preparação de amostras e limpeza de recipientes mas a obtenção de água destilada acarreta num grande consumo de água e energia elétrica.

Um destilador elétrico consome em média 0,7 kWh de energia elétrica para cada litro de água destilada produzido. Assim, se o destilador for gerido por energia solar poderia ter grande redução no custo da água destilada.

Além disso, um sistema como este poderia ser utilizado para fornecer água potável a pessoas que vivem em regiões onde a água apresenta altos índices de salinidade ficando, portanto, imprópria para o consumo (GARCIA & RODRIGUEZ, 2003).

Em alguns estados nordestinos estão em andamento programas de implantação de projetos e estudos específicos, em empresas de geração e distribuição de energia elétrica, universidades e empresas privadas. Estes programas são de pouca abrangência e se destinam a levar energia elétrica de origem solar a pequenas comunidades, vilas, povoados, regiões remotas e prover sistemas de bombeamento para água potável (BEZERRA, 2005).

O estudo da tecnologia e a avaliação dos concentradores solares são importantes pelo fato de servir como referência para outras instituições, considerando-se o caráter pioneiro dessa tecnologia no país.

No Capítulo 1 é apresentado o rastreador de radiação solar, em que o operador pode inserir as condições de rastreamento e escolher rastrear sobre um ou dois eixos. Fez-se, também, uma análise econômica para verificar a viabilidade econômica do rastreador.

No Capítulo 2 foi feita uma breve revisão de literatura sobre painéis fotovoltaicos. Mostrou-se também o efeito do rastreamento sobre a potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos.

O Capítulo 3 traz revisões de literatura sobre coletores solares concentradores, fazendo uma abordagem teórica e prática da montagem dos mesmos. Descreve-se a metodologia utilizada na montagem de um coletor solar tipo calha. Ainda neste capítulo, faz-se um estudo da eficiência e da viabilidade técnica e econômica do coletor construído.

Uma breve revisão sobre as relações geométricas terra-sol são apresentadas no Apêndice A. O Apêndice B traz os resultados das simulações feitas a fim de se observar o efeito da latitude e do rastreamento na radiação incidente sobre superfícies móveis e fixas.

O rastreador desenvolvido e validado em prova de conceito apresenta características intrínsecas se mostrando mais versátil e preciso que os seguidores solar.

Bibliografia

BEZERRA ARNALDO MOURA, *A participação da energia solar no contexto energético mundial do próximo milênio*, disponível em <http://mourabezerra.sites.uol.com.br/textos.htm> (acessado em setembro 2005).

CEPEL - CENTRO DE PESQUISA EM ENERGIA ELÉTRICA, Tutorial: *Energia solar fototérmica*, disponível em <http://www.cresesb.cepel.br> (acessado em dezembro de 2004)

COLLE S.A. E PEREIRA E.B., *Atlas de Irradiação Solar do Brasil (Primeira Versão para Irradiação Global Derivada de Satélite e Validada na Superfície)*, Instituto Nacional de Meteorologia INMET, Brasília, (1998), 58 pp.

GARCÍA-RODRÍGUEZ L., *Renewable energy applications in desalination: state of the art*, *Solar Energy* 75, 381-393. 2003.

KARL-HEINZ F., KLAUS H., CHRISTOPH R., *Aplicações industriais da radiação solar*, *Institute of Technical Thermodynamics – Solar Research*, Alemanha, (1999) disponível em <http://www.german-renewable-energy.com/downloads/pdf> (acessado em setembro 2005)

TIBA C. et al., *Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres*, Editora Universitária da UFPe, Recife, 2000.

Objetivos

Construir o protótipo de um rastreador solar que:

- seja capaz de localizar regiões com maior radiação;
- permita ao operador selecionar as condições para que se realize o rastreamento;
- faça rastreamento sob um ou dois graus;
- tenha precisão;

Comparar painéis fotovoltaicos rastreadores com painéis fotovoltaicos fixos para:

- verificar o efeito do rastreamento na conversão energética;
- avaliar a viabilidade técnica.

Construir um coletor solar concentrador cilindro-parabólico, avaliar sua eficiência, temperatura média de operação e sensibilidade a radiação difusa.

Verificar a viabilidade econômica do sistema construído.

1 O rastreador

1.1 Introdução

A fim de aumentar a viabilidade econômica de sistemas de conversão de energia solar, vários pesquisadores desenvolvem equipamentos de seguimento solar ou os utilizam em pesquisas. Estes dispositivos são empregados em transformação térmica, conversão fotovoltaica, concentradores de energia ou em aparelhos de medição (radiômetros). O objetivo do equipamento de seguimento solar é manter a superfície de conversão, sempre voltada para o Sol, em posição perpendicular aos raios solares.

1.2 Revisão de literatura

Os rastreadores solares podem ter geometrias variadas. POULEK & LIBRA (1998), por exemplo, apresentaram um seguidor solar onde o eixo motor, alimentado por corrente contínua, é acionado diretamente por um arranjo de células fotovoltaicas. Neste, as células são instaladas com um ângulo de inclinação igual à latitude local em relação à reta normal ao conjunto de painéis fotovoltaicos, formando uma célula com duas faces. Desta forma, o seguidor não necessita de baterias ou sistema eletrônico de controle.

Este equipamento pode funcionar como seguidor com eixo móvel horizontal, norte-sul ou polar (com ângulo de rotação ou seguimento de até 120°), bastando fazer os ajustes e arranjos de instalação para cada caso. O ganho máximo obtido pelo sistema é de 95% do esperado para um seguidor ideal, afirmam os autores.

POULEK & LIBRA (2000), desenvolveram um seguidor solar de montagem muito simples, podendo ser usado no espaço (satélites) ou na superfície terrestre. É baseado no uso de novas células fotovoltaicas (bi-faciais) para o acionamento direto do eixo motor que suporta os módulos fotovoltaicos. O eixo motor pode girar 360° e não necessita de sistemas eletrônicos de controle. Segundo os autores o ganho alcançado pelo sistema também pode

chegar a 95% do obtido por um seguidor ideal.

De maneira semelhante, KARIMOV, et al. (2005), apresentaram um sistema de seguimento solar em que alimentação do motor de movimentação é feita diretamente pelos módulos fotovoltaicos do sistema. O sensoriamento da posição do sol, também é feita pelos módulos, que são montados de forma piramidal, com ângulo entre eles variando de 160° a 175°. Com isto, sempre que os conjuntos de módulos, dois pares pelo menos, (4 módulos), não estiverem alinhados com o Sol, aparece uma diferença de potencial que aciona o motor na direção de ajuste. A montagem do eixo que suporta os módulos é do tipo polar. O ângulo de seguimento do eixo motor é de 120° e a precisão de seguimento é de $\pm 10^\circ$.

Em Sanliurfa, Turquia; foi apresentado um trabalho que analisa o melhor ângulo de inclinação e orientação de um sistema fixo, (KACIRA, et al., 2004). Também compara o rendimento do sistema fixo, em relação a um sistema com seguidor solar de dois eixos, sendo que o último apresenta um ganho de 35% em relação ao primeiro, quando orientado para o sul e com inclinação de 14° (Sanliurfa), em um dia particular de junho (OLIVEIRA, 2008).

Em OLIVEIRA (2007), o autor apresenta o projeto de um seguidor solar tipo polar, que não necessita de baterias para o acionamento do motor elétrico. A alimentação do motor e do circuito de controle é feita diretamente dos módulos fotovoltaicos do sistema. A movimentação dos painéis fotovoltaicos se baseia numa mecânica com caixa de redução, contrapeso e um carretel que enrola e desenrola um cabo de aço que faz a movimentação. Dois sensores LDR (resistor dependente de luz) são dispostos em lados opostos de uma parede para que ocorra sombra sobre um deles sempre que não estiverem alinhados (em frente ao Sol). O circuito de controle acionará o motor para posicionar o conjunto fotovoltaico na posição ideal. O ângulo máximo de rastreo é de 140° e a precisão no seguimento para dias de céu limpo é de $\pm 1^\circ$, obtendo-se um aumento de eficiência de 31% em relação a um sistema fixo.

MAVROMATAKIS & FRANGHIADAKIS (2008), apresentaram um novo seguidor azimutal que, utilizando uma mecânica sofisticada e apenas um motor elétrico, faz o movimento de correção do azimute e inclinação da superfície de conversão. O ajuste da inclinação é condicionado a uma regulagem que

considera o solstício de inverno e verão. Este aparato não tem a mesma precisão de um sistema de dois eixos (com dois motores), mas obtém um ganho de até 98% de um sistema ideal de seguimento solar (dois eixos).

ABOUZEID (2001) descreve um seguidor solar que utiliza motor de passo. Com o uso deste tipo de motor não é necessário usar sistemas mecânicos sofisticados. O controle do motor e posicionamento do sistema é realizado por um controlador programável. Os sensores utilizados são duas células fotovoltaicas. O tipo do seguidor montado é polar. A precisão do passo é de 7,5°.

MOSALAM, et al., 1995, utilizaram um seguidor solar de dois eixos para comparar o rendimento de um conjunto fixo e dois conjuntos de células policristalinas e amorfas, ambos com seguimento solar, sendo que um dos conjuntos móvel utiliza concentrador tipo V (com espelhos).

Utilizando dois sistemas de conversão fotovoltaicos para bombeamento de água, um com seguidor solar (de ajuste leste-oeste) e outro fixo, VILELA, et al., 2003 fizeram comparação do aumento de rendimento do conjunto com seguidor em relação ao fixo. Foi verificado o acréscimo de 19% e 24% da irradiação coletada pelo sistema móvel em relação ao fixo. O aumento da quantidade de água bombeada pelo sistema com seguimento em relação ao fixo foi de 37% e 41%, respectivamente aos acréscimos de radiação citados.

O sistema de seguimento utilizado tem um eixo móvel (tipo polar), com inclinação de 20° (Recife, latitude -8,03°). O ajuste de posicionamento é realizado por controle eletrônico, que usa dois sensores LDR (resistor dependente de luz) conectados na forma diferencial, para o posicionamento.

ROTH, et al. (2004) descrevem um seguidor solar de dois eixos. O equipamento usa dois pequenos motores de corrente contínua para o movimento de correção do azimute da superfície e inclinação. O mecanismo foi utilizado para posicionar um pireliômetro em frente ao Sol, para efetuar medidas de radiação direta.

O equipamento ainda utilizou um sensor para detectar noite ou dia, e um sensor de 4 quadrantes para determinar a posição solar. Todo o sistema é controlado por um micro controlador. Segundo os autores, é possível utilizar o projeto em sistemas maiores em painéis solares e concentradores.

CANÃDA, et al., 2007 descreveram o desenvolvimento de um seguidor

de dois eixos, utilizado para medidas de radiação solar por meio de um espectro radiômetro, utilizando-se dois motores de passo para correção do azimute e da inclinação do conjunto.

Um diodo emissor de luz e um fotodetector são usados como chave liga-desliga, para através de cortes de tensão na base do circuito.

O sistema é totalmente controlado por um computador, tanto para o hardware, como para a aquisição dos dados dos instrumentos de medida. O software foi desenvolvido em um compilador C e todo o controle é realizado através da porta paralela do computador.

1.2.1 O seguidor solar

Seguidor solar é um dispositivo utilizado para orientar um painel ou arranjo de painéis fotovoltaicos, concentradores de energia, ou coletor solar, de forma que estejam sempre voltados para o Sol, para que haja uma maior incidência de raios solares perpendiculares à superfície dos mesmos. Deste modo, o rendimento do sistema aumenta devido a maior incidência da componente de energia direta.

O seguimento solar pode ser obtido por cálculos de posicionamento do conjunto de conversão de energia, onde são considerados parâmetros como declividade terrestre, latitude, ângulo horário, dia do ano etc., usados onde o grau de precisão é importante. Na maioria das aplicações de sistemas ativos de seguimento, arranjos de sensores ópticos são o suficiente para determinar a posição solar, utilizando-se de sistemas eletrônicos.

1.2.2 Tipos de seguidores solares

Os modelos de seguidores solares podem ser ativos, impulsionados por motores elétricos e conjunto de polias ou engrenagens ou passivos, quando o conjunto impulsor é baseado no deslocamento de um fluido, geralmente na forma gasosa, aquecido pela energia solar. Eles podem ter um ou dois eixos de movimentação.

Quando têm apenas um eixo, este pode ter orientação polar, norte-sul ou leste oeste. Com dois eixos, um deles é vertical para ajustar o azimute da superfície e o outro é horizontal, para ajustar a inclinação dos painéis.

Nesse item, serão descritos os principais modelos de seguidores ativos. O tratamento matemático adotado para cada tipo é o descrito por DUFFIE & BEKMAN (1980).

1.2.3 Movimento sobre eixo horizontal orientado na direção leste-oeste

Este tipo de montagem é usado em concentradores de energia radiante com espelhos cilíndrico-parabólicos, onde o ponto focal do sistema tem geralmente um tubo no qual um fluido é aquecido. Também pode ser usado em conjunto de painéis fotovoltaicos, onde é minimizado o ângulo de incidência da radiação direta. Na Figura 1.1, observa-se os principais ângulos que envolvem este modelo, onde \Re é a reta auxiliar paralela ao plano local, N é a normal ao plano, s reta que vai da Terra ao centro do Sol e z é o zênite local.

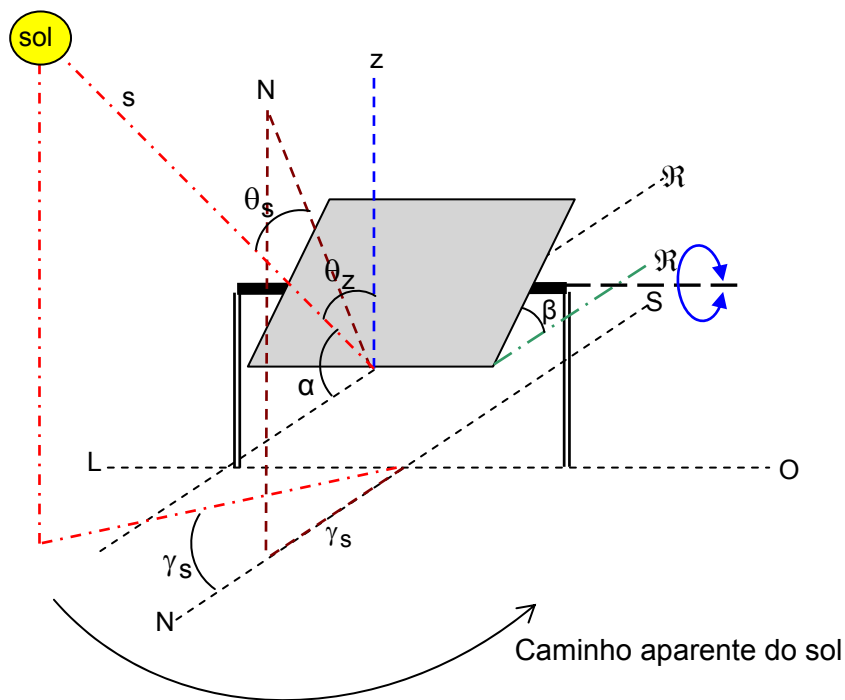


Figura 1.1: Seguidor com eixo horizontal leste-oeste.

Com o uso de relações trigonométricas chega-se à equação 1.1, usada para determinar o ângulo de incidência da radiação direta.

$$\cos \theta_S = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha \sin^2 \omega} \quad (1.1)$$

em que,

θ_s = ângulo de incidência direta;

α = ângulo de declividade terrestre;

ω = ângulo horário (definido no APÊNDICE A).

Para calcular a inclinação do painel, usa-se a equação 1.2:

$$\tan \beta = \tan \theta_z |\cos \gamma_s| \quad (1.2)$$

em que,

β = ângulo de inclinação do painel;

θ_z = ângulo de zênite;

γ_s = ângulo de azimute solar.

O ângulo de azimute solar irá variar com a trajetória aparente do Sol durante o dia mas o azimute do conjunto ficará fixo. No hemisfério sul seu valor será 180° e no hemisfério norte será 0°.

Este tipo de equipamento é de montagem robusta e de baixa manutenção, mas seu uso é restrito pois não apresenta um ganho importante para estações com dias curtos (grande declinação solar). Seu funcionamento baseia-se em seguir a trajetória aparente do Sol, começando em sua posição de nascimento. Quando o Sol se encontra no ponto de maior altitude solar, a inclinação do painel será mínima. Depois, o painel começará a voltar à posição inicial de amanhecer (que é igual a do entardecer). Montagens como estas são encontradas em algumas instalações fotovoltaicas. Como exemplo pode se citar a Central Solar de Serpa (Portugal), onde foram instalados 52.000 módulos fotovoltaicos, gerando 11 MW de potência.

1.2.4 Movimento sobre eixo horizontal orientado na direção norte-sul

Trata se de uma montagem muito semelhante à apresentada no item 1.2.2, apresenta um bom rendimento de conversão e fácil manutenção. A Figura 1.2 ilustra seu funcionamento e os principais ângulos envolvidos (os ângulos já foram relacionados anteriormente).

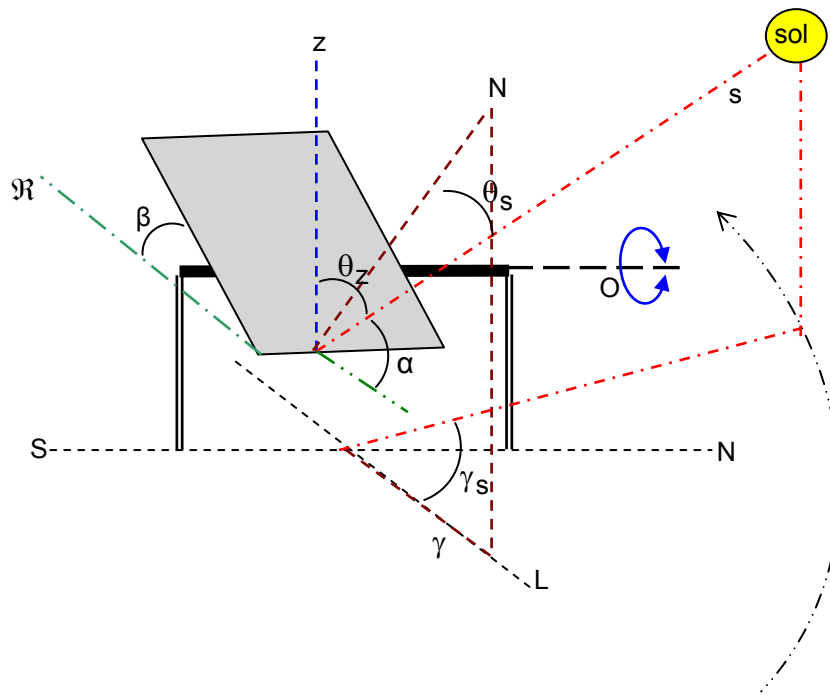


Figura 1.2: Seguidor com eixo horizontal sul-norte.

A equação 1.3 é utilizada para determinação do ângulo de incidência da radiação direta.

$$\cos \theta_S = \sqrt{\cos^2 \theta_Z + \cos^2 \alpha \sin^2 \omega} \quad (1.3)$$

em que;

α = ângulo de declividade terrestre;

ω = ângulo horário;

θ_Z = ângulo de zênite;

θ_S = ângulo de incidência direta.

Para a determinação do ângulo de inclinação do painel usa-se a equação 1.4.

$$\tan \beta = \tan \theta_Z |\cos(\gamma - \gamma_S)| \quad (1.4)$$

O azimute da superfície terá o valor de -90° se o azimute solar for menor que 0° . Se o azimute solar for maior que 0° , o valor do azimute da superfície será 90° . O azimute da superfície será -90° , até o Sol cruzar a posição de maior elevação, momento que o caminho aparente solar muda do leste para o oeste. A partir daí o valor do azimute passa para 90° .

1.2.6 Seguidor com eixo vertical móvel (azimutal)

Este modelo usa um motor impulsor no eixo vertical fazendo o seguimento no sentido leste-oeste.

É um modelo de montagem mecânica e elétrica simples e tem um bom desempenho em latitudes e estações do ano onde os dias são longos. O ajuste da inclinação do conjunto de painéis é feito manualmente conforme a estação.

O sistema de seguimento azimutal tem um baixo custo de montagem e manutenção, e é uma opção simples para painéis fotovoltaicos. Na Figura 1.4 observa-se o princípio de funcionamento e a geometria dos ângulos importantes deste seguidor solar.

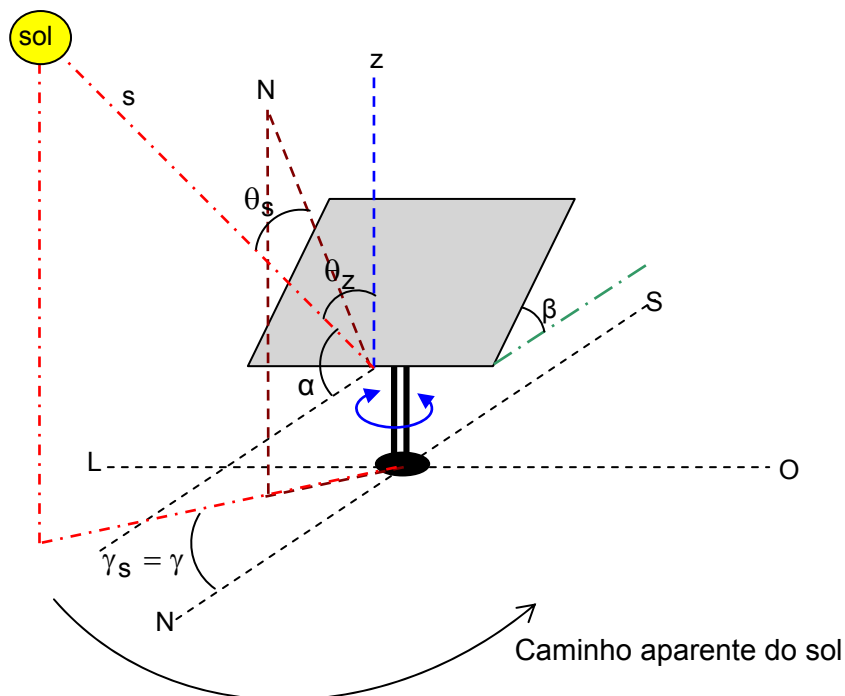


Figura 1.4: Seguidor eixo vertical móvel.

Neste tipo de seguidor o movimento do eixo vertical faz com que o ângulo de azimute da superfície, γ , seja igual ao ângulo de azimute solar, γ_s , sendo as equações aplicadas a este modelo descritas a seguir. O ângulo de incidência direta, θ_s , é dado pela equação 1.5:

$$\cos \theta_s = \cos \theta_z \cos \beta + \text{sen} \theta_z \text{sen} \beta \quad (1.5)$$

em que,

θ_s = ângulo de incidência, em graus;

θ_z = ângulo azimutal, em graus;

β = ângulo de inclinação do plano.

O valor de β adotado geralmente é o valor da latitude ϕ local. Diversos estudos informam sobre a importância do ângulo de inclinação de painéis [KACIRA et al., 2004; SHAYANI, 2006].

1.2.7 Seguidor com movimento sob dois eixos

O seguimento em dois eixos tem movimentação azimutal (eixo vertical) e de inclinação (eixo horizontal) o que proporciona um grande rendimento de conversão da componente direta da radiação solar. Este tipo de equipamento pode ser usado em montagens de conversão direta, ou em concentração de irradiância, com espelhos ou lentes. Os ângulos e a movimentação dos eixos deste sistema são mostrados na Figura 1.5.

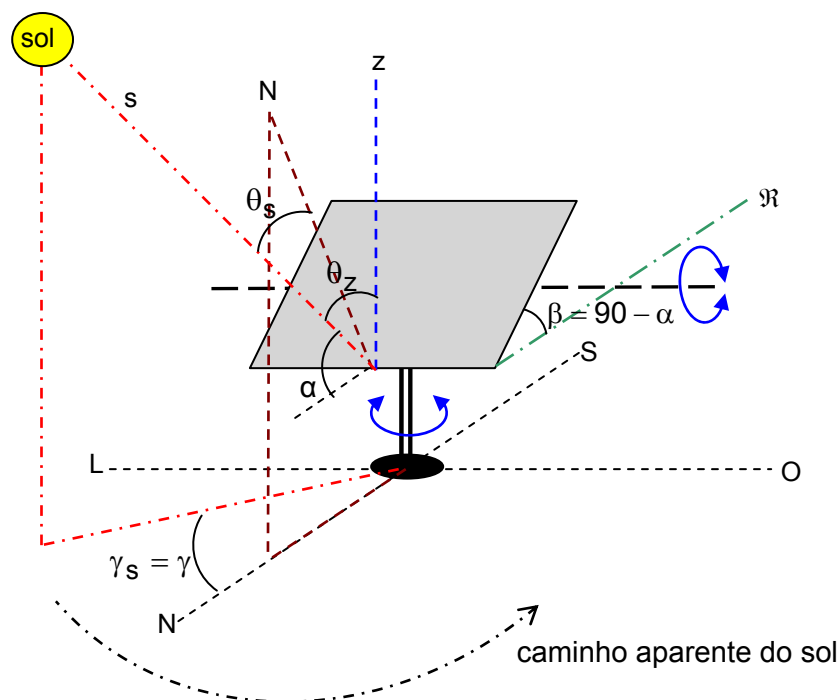


Figura 1.5: Seguidor solar, eixo vertical e horizontal móvel.

Os ângulos deste modelo são os mesmos já comentados nos modelos anteriores. A equação do ângulo de incidência direta é bastante simplificada devido ao movimento dos eixos horizontal e vertical, fazendo com que o ângulo

de incidência direta seja igual a zero.

Com o movimento no eixo horizontal, tem-se a correção constante da inclinação do painel em relação ao Sol, fazendo com que a inclinação do painel e a elevação do sol sejam ângulos complementares. O movimento em torno eixo vertical faz a correção do azimute, com isso o azimute do coletor solar ficará igual ao azimute do sol.

1.3 Posicionamento de equipamentos de seguimento solar

A maior parte dos sistemas de seguimento solar ativo é controlada por circuitos eletrônicos que, utilizando lógica digital e sensores óticos, determinam o correto posicionamento do Sol, orientando o conjunto de módulos perpendicular aos raios solares. Com a grande redução de custos de microprocessadores e microcontroladores e o aumento da confiabilidade destes, os circuitos de controle de seguimento solar tiveram uma redução em seus valores, viabilizando sistemas seguidores.

Na maioria das aplicações de sistemas de seguimento solar, o posicionamento do conjunto de conversão de energia é baseado em sensores óticos como foto transistor, fotodiodo, LDR (resistor dependente de luz) e células fotovoltaicas. Os sensores óticos são usados em pares e uma parede entre os dois é colocada de forma que um não veja o outro. Assim, quando estiverem igualmente iluminados pelo Sol, haverá igual incidência de radiação solar, o que garante que estarão voltados para o Sol. Caso contrário, o sistema de controle ira determinar o acionamento do motor de movimentação de azimute para que o conjunto se posicione de forma a receber os raios solares perpendiculares aos painéis de conversão de energia. No movimento do eixo de elevação do conjunto, usa se o mesmo tipo de controle ótico.

Alguns equipamentos usam pequenos painéis fotovoltaicos com duas faces para alimentar diretamente o motor de acionamento do conjunto. Quando o Sol ilumina uma de suas faces ele aciona o motor na direção que esta recebendo a luz até que este fique paralelo aos raios solares, significando que o conjunto está voltado para o Sol.

Existem outros sistemas baseados em relógios, discos perfurados, sensores térmicos, pares metálicos, etc. Na escolha do sistema a ser utilizado,

itens como custo de implementação, manutenção e controle devem ser considerados mas o principal é atender à precisão necessária a cada projeto, por exemplo, concentradores parabólicos esféricos, que necessitam de grande acuidade do rastreador.

1.4 Objetivos

Descrever o processo de construção de um sistema eletromecânico controlado por um sistema de controle e sensores de intensidade de radiação (LDR).

Descrever o rastreador solar de dois eixos montado no Laboratório de Energia do Departamento de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa.

Montar um equipamento baseado num sistema de controle eletrônico programável e uma montagem mecânica de cremalheiras e polias com custos inferiores aos praticados no mercado.

Utilizar o equipamento desenvolvido para rastrear regiões mais claras no céu, para verificar o efeito sobre painéis fotovoltaicos.

Comparar custos com sistemas de rastreamento disponíveis comercialmente.

1.5 Material e métodos

O equipamento rastreador desenvolvido executa movimento em dois eixos e caracteriza-se pela simplicidade mecânica. Sua estrutura é construída com tubos de duas polegadas, mancal, barra rosqueada e perfis de metalon. O sistema mecânico de movimentação, no eixo horizontal, é baseado em um conjunto formado por polia e uma barra rosqueada e usa como elemento impulsor um motor elétrico de corrente contínua, com caixa de redução, acoplado diretamente à barra rosqueada.

O motor tem velocidade nominal de 1800 rpm e por meio da caixa de redução, obtém-se uma redução de velocidade para até 100 rpm. A cremalheira reduz para aproximadamente 10 rpm, Figura 1.6.

Esta montagem elimina o risco de deslizamento e garante a estabilidade nos intervalos que o motor fica desligado.

No rastreamento em torno do eixo horizontal, o motor cc utilizado tem potência nominal de 60 W e aciona utilizando uma cremalheira modificada onde o eixo da polia foi substituído por uma barra rosqueada, como ilustra a Figura 1.6. Este procedimento foi tomado porque a cremalheira montada anteriormente não resistiu, perdendo a rosca no interior da polia.

A nova montagem reduziu ainda mais o torque necessário ao movimento e o motor de passo foi substituído por um motor cc, por ter maior velocidade de rotação, exigida pela grande redução.

A barra que passa no centro da polia (Figura 1.6) tem uma de suas extremidades presa ao coletor solar que será apresentado no capítulo 3. Isso garantiu maior estabilidade ao coletor e liberdade de 270° em torno do eixo horizontal.

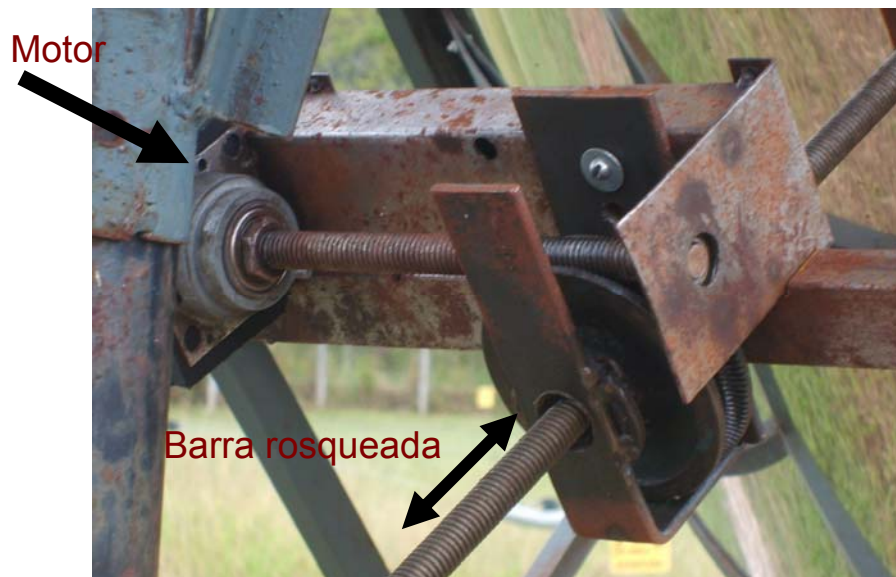


Figura 1.6: Cremalheira modificada para movimento em torno de eixo horizontal.

O rastreamento no eixo vertical foi feito por um motor de passo com potência nominal de 18 W que aciona um sistema de cremalheira com liberdade de rotação de até 360°.

Para a montagem, foi feita uma rosca no interior de uma polia de 20 cm de diâmetro e, com o uso de uma barra rosqueada fixada diretamente no eixo do motor construiu-se a cremalheira. Uma foto da montagem (cremalheira – motor) é apresentada na Figura 1.7.

O acionamento dos motores foi feito por um circuito microcontrolado, de acordo com o sinal dos sensores.

A substituição de um dos motores de passo por um motor de corrente contínua (cc) exigiu alterações no circuito, sendo necessário o uso de relés para o acionamento do motor cc.



Figura 1.7: Cremalheira e motor de movimentação sobre eixo vertical.

O circuito foi construído a partir de uma placa de circuito impresso (fenolite) corroída em solução aquosa de perclorato de ferro. Fez-se a impressão do esquema do circuito, gerado em software específico, em folha de acetato. Para transferir a imagem para a placa aplicou-se sobre esta uma fina camada de emulsão fotográfica, colocou-se a folha de acetato sobre a placa e expôs-se a luz halógena por dois minutos, para sensibilização do filme fotográfico. Concluídos estes passos lavou-se a superfície da placa em água corrente para remoção do filme sensibilizado pela luz, partindo logo após para o processo de corrosão. A figura 1.8 apresenta o circuito projetado.

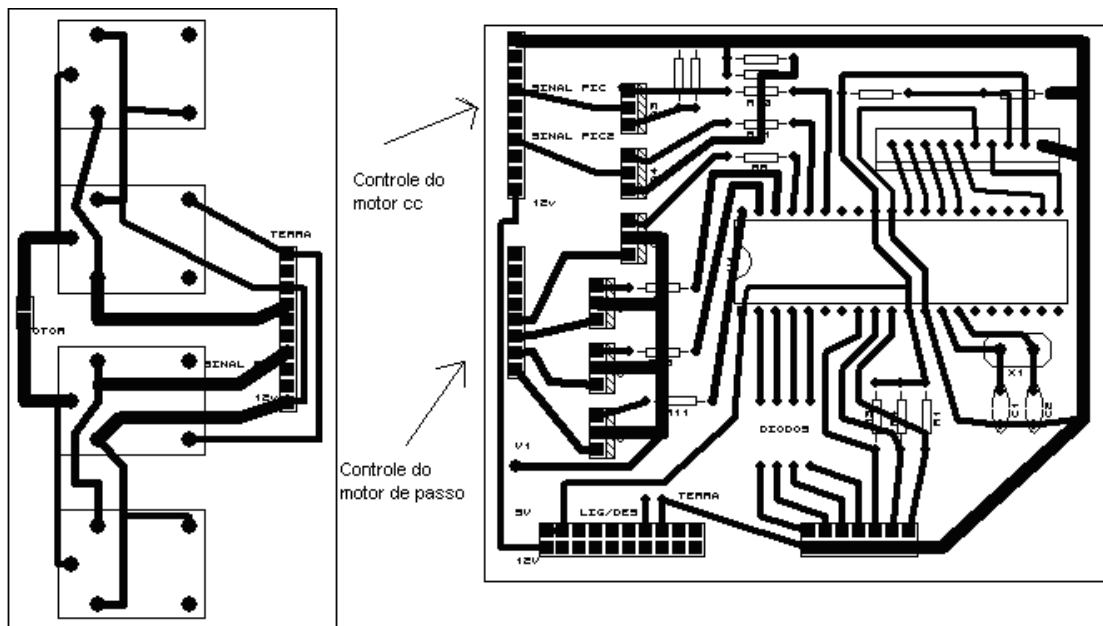


Figura 1.8: Placa de circuito.

Para inversão de sentido de rotação do motor cc foram utilizados quatro relés de 3 volts e 40mA. Assim um TIP122 acionava dois relés ligando ao pólo positivo e negativo ao motor. Quando necessário inverter o sentido do motor os relés eram desligados e outro TIP122 acionava outros dois relés ligando o motor com polaridade invertida.

O PIC é o responsável pela inversão de sentido e acionamento dos relés, não havendo risco da ligação dos quatro relés ao mesmo tempo.

O motor de passo foi ligado diretamente aos transistores e a seqüência lógica de passos passada pelo PIC dava origem à rotação no sentido horário ou anti-horário, de acordo com a comparação de sinais enviados pelos sensores.

O Quadro 1-1 apresenta os componentes eletrônicos e os equipamentos utilizados na elaboração da parte eletrônica do rastreador.

Quadro 1-1: Componentes eletrônicos e equipamentos utilizados no rastreador.

Componente	Quantidade	Especificação
Placa de circuito impresso	100cm ²	fenolite
Micro-controlador	1	PIC16F877A
Capacitores	6	-
Display	1	LCD 16 X 2
Transistor	4	TIP122
Relés	4	3 V 40mA
LDR	4	
Resistores	10	1kOhm
Resistores	1	10MOhm
Resistores	8	560Ohm
Resistores	10	220Ohm
Diodos	4	1n4007
Crystal	1	4MHz
Fonte de computador	1	ATX
TIP	8	122
Chaves de acesso	2	push buttons
Motor de passo	1	3V por fase 3A
Motor cc	1	36V 1A
Chave	1	Liga/desliga

Os pares de sensores foram montados no interior de um tubo opaco e recebiam a mesma radiação quando o sistema se encontrava voltado para o sol (alinhado). Quando ocorria um desvio ou mudança nas condições de iluminação, o sinal gerado por um dos sensores do par fica diferente o suficiente para provocar uma tomada de decisão do micro-controlador. A figura 1.9a ilustra como os sensores foram distribuídos no interior do tubo em que, Š1 e Š2 formam um par de sensores para correções na posição em torno um eixo vertical e Š3 e Š4 são usados para correção em torno de um eixo horizontal. Na Figura 1.9b é mostrado o sensor Š1 numa região de sombra, isso faz com que sua resistividade aumente e o sinal medido pelo PIC se torne menor que o sinal gerado no sensor Š2. Ao comparar os sinais, a tomada de decisão será com o propósito de fazer o sistema girar no sentido de Š1, fazendo a correção da inclinação.

O sensor Š4 é mostrado numa região de sombra na Figura 1.9c, o que acionaria o motor para uma correção do azimute.

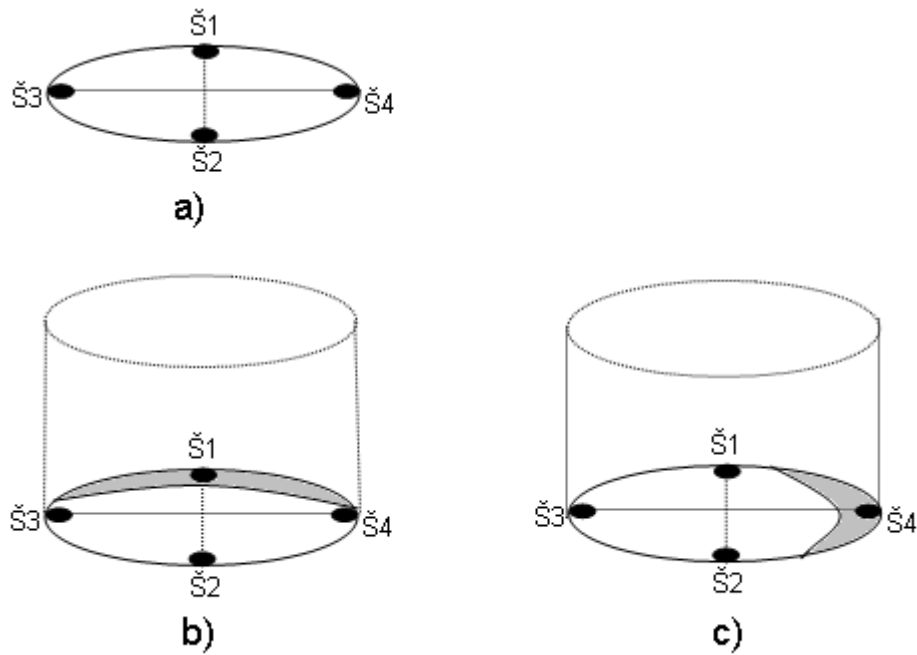


Figura 1.9: a) disposição dos sensores; b) sensor Š1 sombreado c) sensor Š2 sombreado.

Cada sensor foi feito com o uso de uma resistência elétrica R_f , um resistor de ajuste R_a , um capacitor C_1 e um LDR, montados em forma de divisor de tensão e o sinal de saída para o PIC é dado pela Equação 1.6. A Figura 1.10 ilustra o circuito feito para esse fim, em que a resistência R_a é um resistor variável para compensar possíveis diferenças entre os LDRs.

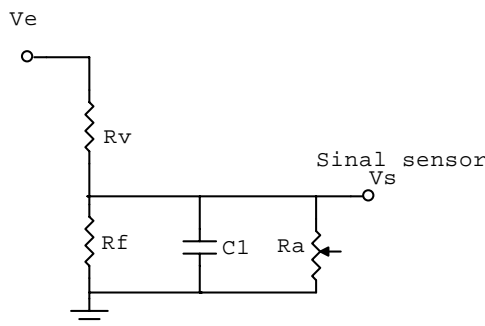


Figura 1.10: Divisor de tensão do sensor.

Foi colocado um capacitor no divisor de tensão para amortecimento de possíveis oscilações no circuito. Em regime permanente o capacitor não causará nenhum efeito.

$$V_s = \left(\frac{R_f R_a}{R_v R_f + R_a (R_v + R_f)} \right) V_e \quad (1.6)$$

em que,

V_s = sinal de tensão medido pelo PIC, em volts;

R_f = resistência de valor fixo, em ohms;

R_v = resistência variável com a intensidade da luz (LDR), em ohms;

V_e = tensão de entrada no divisor, 5 volts;

R_a = resistência de ajuste, em ohms.

O sistema de controle eletrônico do seguidor usa um micro-controlador (PIC) 16F877A, que faz o gerenciamento de todas as funções do sistema. O circuito é confiável, simples e de baixo custo. As funções controladas são:

- sensoriamento das regiões mais claras do céu;
- início e fim de curso; com o sensoriamento de luz do dia e noite;
- sensoriamento de posição dos painéis em frente ao Sol;
- controle do motor e reversão de sentido do mesmo;
- programável para qual intensidade de sinal fazer rastreamento;
- não movimentação do sistema em períodos de ausência de radiação;
- pode ser programado para aguardar informações do movimento realizado anteriormente;
- rotinas de temporização;
- permite rastreamento somente azimutal se houver interesse;
- permite somente rastreamento polar.
- permite rastreamento em dois eixos.

Com os botões de acesso pode-se configurar o rastreador de acordo com as condições de luz para que se inicie o rastreamento. É permitido ainda deixar um dos motores desligado ou até mesmo mais sensível a variações de intensidade de radiação, dando ao operador a liberdade de escolha dos parâmetros que melhor se adapte às condições regionais.

Pode se determinar a sensibilidade do rastreador a partir da diferença entre os sinais de tensão dos sensores. O valor pode ser ajustado entre zero e 2,54 volts com um incremento de 0,02 volts. Quando se determina uma diferença de 2,54 volts (valor nunca alcançado) o motor simplesmente não é acionado, e quando se determina uma diferença de 0,00 volts o motor é sempre acionado, a não ser que os dois sensores tenham exatamente mesmo sinal (muito raro). O ponto Diferença de Sinal 0,00 volts é utilizado para ajustar

o resistor variável R_a , isso é feito colocando todos os sensores sob iguais condições de iluminação. Uma vez que este resistor foi colocado no divisor de tensão para justificar possíveis diferenças entre os LDRs.

1.6 Resultados e discussão

A montagem de um conjunto de sensores baseado num divisor de tensão e com resistor variável deu maior autonomia a ajustes e melhorou as condições de rastreamento. O conjunto desenvolvido encontra-se na figura 1.11.

Um primeiro protótipo utilizando fotocélulas apresentou alta sensibilidade mas com alguns minutos de operação o efeito capacitivo das fotocélulas interferiu no rastreamento impossibilitando o seu uso. Então, optou-se por colocar um resistor no pólo positivo do sensor e ligá-lo ao neutro do circuito. Aparentemente havia resolvido o problema, mas posteriormente o PIC queimou as entradas (conversor analógico digital).

Os dados de irradiância coletados experimentalmente em intervalos de 0,3 segundos são apresentados em gráficos. Os gráficos contêm os valores de irradiância incidentes nos planos de um sistema fixo e no plano do rastreador, além da irradiância incidente no plano horizontal. Durante o período de realização das medidas ocorreram dias com as mais diversas condições climatológicas, permitindo avaliar o desempenho do sistema de rastreamento para cada situação.

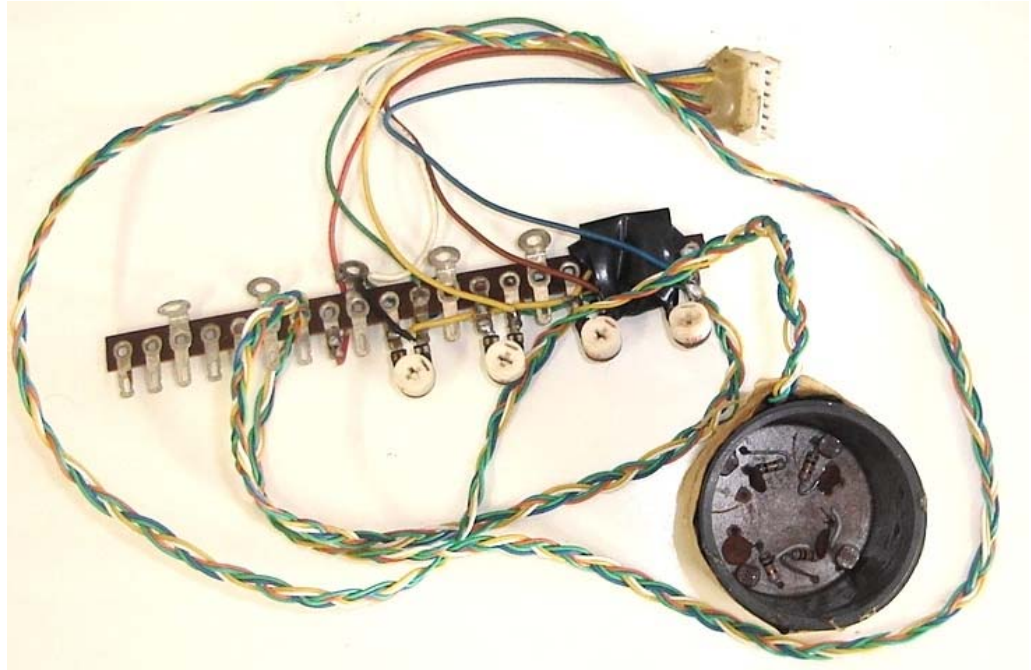


Figura 1.11: Conjunto de sensores no interior do tubo.

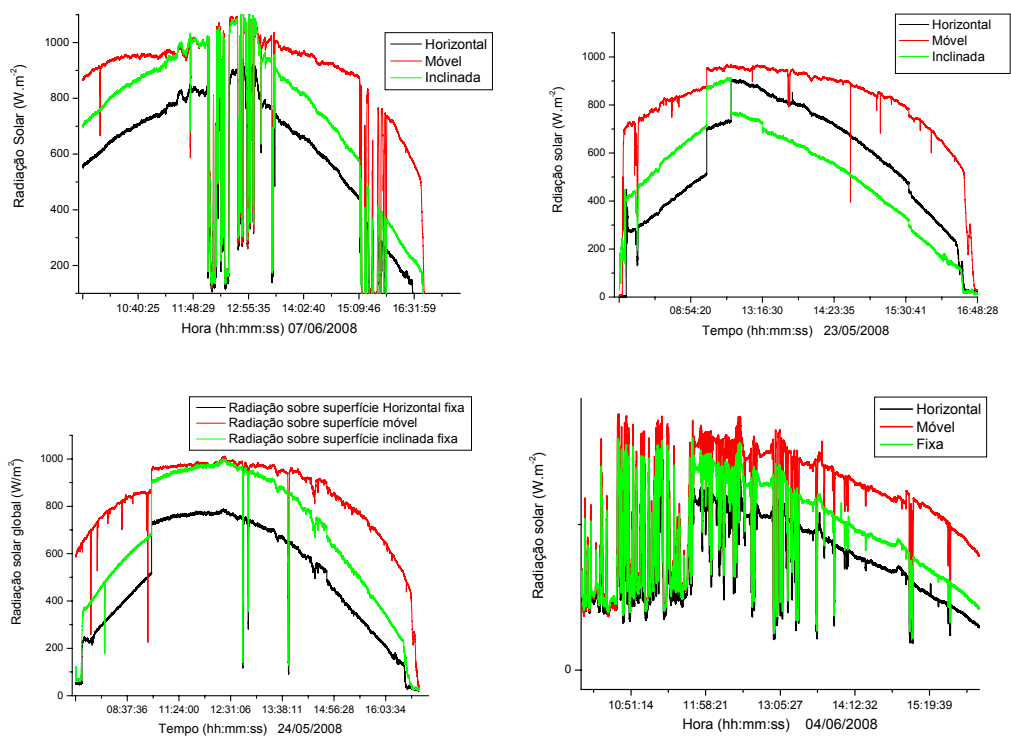


Figura 1.12: Gráficos de radiação solar durante alguns dias de experimento.

A Figura 1.12 apresenta as curvas de radiação solar para os dias 23 e 24 de maio de 2008 e para o dia 04 e 07 de junho de 2008. Pode se observar que, mesmo em dias com grande incidência de nuvens, o sistema rastreador foi capaz de rastrear regiões mais claras no céu. Diferente de sistemas que

buscam apenas maximizar a radiação direta, o sistema apresentou ganho energético em dias de alta nebulosidade. No dia 04/06/2008, no período de 11:00hs às 13:00hs, quando geralmente as duas superfícies recebem aproximadamente a mesma intensidade de radiação, houve muitas nuvens prejudicando a conversão fotovoltaica. Depois, a partir das 13:00hs as nuvens diminuíram e registrou-se o melhor resultado do painel rastreador em relação ao fixo, chegando à 70% a diferença, como foi comentado no Capítulo 2.

Durante o período de alta irradiância, observa-se uma sobreposição quase completa entre os valores de radiação solar na superfície móvel e fixa. Para estas condições de irradiância solar, o rastreador foi capaz de seguir o Sol com erros de no máximo 2 graus, o que permitiu o uso do sistema no concentrador solar que será apresentado no capítulo 3. Porém, quando há formação de nuvens o sistema às vezes encontra uma região mais clara no céu. Quando a nuvem se vai, o rastreador volta procurar o sol. Isso pode ter contribuído para baixar a eficiência do coletor concentrador que só apresenta rendimento satisfatório para radiação direta.

O uso do motor foi monitorado com medidas de tensão na alimentação do motor. Assim pôde se observar momentos em que não foram necessárias correções na posição.

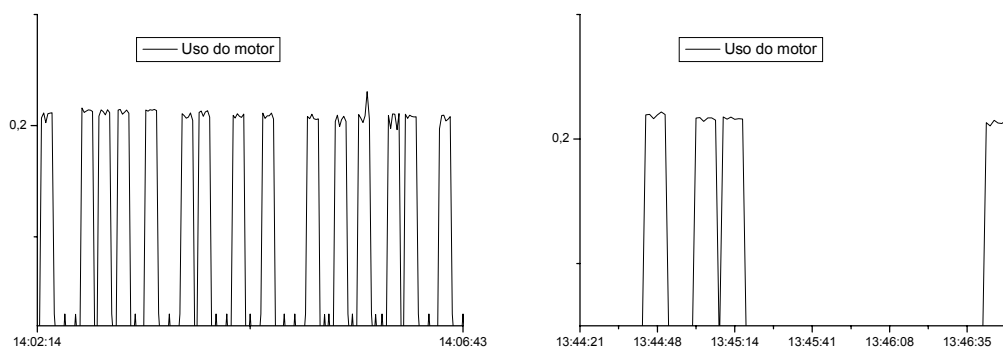


Figura 1.13: Monitoração de uso do motor.

A Figura 1.13 mostra momentos em que o motor é acionado e desligado. Os picos representam instantes em que o motor se encontra ligado. Quando não é necessário o acionamento de outro motor, este mesmo motor pode ser acionado duas ou mais vezes consecutivas. Este comportamento é observado

quando não há intervalo de tempo entre dois picos consecutivos.

O retorno do sistema à posição inicial deveria ser feito invertendo se os passos executados durante o dia, mas apresentou alguns problemas porque a memória do PIC não era suficiente para armazenar todos os passos realizados. O que foi resolvido com uma rotina determinada para o fim do dia, esta rotina faz o motor de rastreamento no eixo vertical voltar à posição inicial, deixando o outro desligado, pois a inclinação desejada pela manhã é idêntica a inclinação que o painel se encontra à tarde. Nestes dois horários a elevação solar em relação ao plano horizonte local é idêntica.

1.7 Análises de custos

O custo do projeto foi levantado com base nos valores comerciais dos componentes eletrônicos utilizados na implementação do sistema eletrônico de controle e no material, serviços usados na construção da estrutura mecânica e manutenção de equipamento.

Quadro 1-2: Componentes eletroeletrônicos e materiais usados no rastreador.

Itens	Quant	Preço Unit	Sub total
Metalon 30x20	2	21,00	42,00
Metalon 20x20	1	17,00	17,00
Barra chata 1 ³ / ₁₆	1	23,00	23,00
Tube suporte	2,5	15,00	37,50
Solda	1	7,50	7,50
Pedreiro e ajudante	1	75,00	75,00
Serralheiro e ajudante	1	75,00	75,00
Motor	1	180,00	180,00
Motor	1	80,00	80,00
Circuito eletrônico	1	320,00	320,00
Custo de operação anual	1	50,00	50,00
Total em R\$			907,00

No quadro 1.2 encontram-se listados os materiais utilizados no rastreador e seus respectivos valores comerciais.

Por comparação de preços com produtos importados percebeu-se que o rastreador desenvolvido é mais barato e oferece mais opções de operação e aplicação.

Segundo OLIVEIRA (2007), um dos maiores fabricantes mundiais de rastreadores solares comercializa um sistema com um eixo de rastreo e capacidade para quatro módulos a um custo de US\$1.250,00. Este valor inclui a estrutura mecânica e o sistema eletrônico de controle. Existe também à venda no mercado um controlador para rastreadores de um eixo produzido por um segundo fabricante ao custo de US\$250,00.

Com a atual cotação do Dólar (R\$2,33), estes equipamentos teriam custos de R\$2912,50 e R\$582,50 respectivamente. Além do desenvolvimento de tecnologia nacional, o baixo custo do rastreador desenvolvido o torna competitivo no mercado da energia solar.

O sistema eletrônico montado movimentou-se sob dois eixos e ainda disponibiliza controles manuais por um custo de R\$580,00 (custo da eletrônica de rastreamento). A qualidade técnica e fatores econômicos tornam-no muito atraente

1.8 Conclusões

O que pôde ser concluído mediante a observação do funcionamento e realização de medições foi que o sistema de rastreamento funciona de acordo com os critérios adotados na elaboração do projeto. Esta montagem é caracterizada particularmente por reduzir ao mínimo a necessidade de mão de obra qualificada para o uso e instalação. Portanto, seu emprego em diferentes latitudes não requer correções ao longo do ano.

A estrutura mecânica montada, embora simples, é capaz de permitir um funcionamento adequado do rastreador. Isto mostrou que o sistema de rastreamento dispensa o projeto de estruturas mecânicas complexas e dispendiosas, podendo oferecer bons resultados utilizando-se uma montagem simples acrescido de um circuito eletrônico de controle dos motores.

O rastreador funcionou adequadamente, mesmo em dias muito nublados, com incidência basicamente de radiação difusa. Os ganhos de energia armazenada variaram de acordo com os valores de irradiância

registrados. Em dias muito nublados, o ganho em energia do rastreador torna-se baixo, mas percentualmente bem melhor que sistema fixo, em dias com céu limpo, o ganho torna-se máximo. Para os dias em que se realizaram medições, o benefício máximo e mínimo observado foi de 70% e 46%, veja capítulo 2.

Os erros observados no acompanhamento do Sol variaram de acordo com os níveis de nebulosidade ocorridos, uma vez que o sistema procura outra região quando nuvens muito densas bloqueiam a radiação direta. O sistema apresentou erros máximos de dois graus para períodos com boa presença da radiação direta.

O custo do rastreador montado foi menor que os praticados no mercado considerando rastreadores de dois eixos.

1.9 Bibliografia

ABOUZEID, M., *Use of a reluctance stepper motor for solar tracking based on a programmable logic array (PLA) controller*. Renewable Energy, vol.23, pp.551-560. 2001.

CANÃDA J., UTRILLAS M.P., MARTINEZ-LOZANO J.A., PEDRÓS R., GÓMEZ-AMO J.L., MAJ A., *Design of a sun tracker for the automatic measurement of spectral irradiance and construction of an irradiance database in the 330–1100nm range*. Renewable Energy, vol.32, pp.2053-2068. 2007.

CASTRO R. M. G., *Energias renováveis e produção descentralizada: introdução a energia fotovoltaica*, Universidade Técnica de Lisboa, 2ª edição, 2008

DUFFIE, J. A. and BECKMAN, W. A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons. 1991,

HEIN M., DIMROTH F., SIEFER G., BETT A.W., *Characterisation of a 300x photovoltaic concentrator system with one-axis tracking*. Solar Energy Materials & Cells, vol.75, pp.277-283. 2003.

KACIRA, M., SIMSEK, M., BABUR, Y., AND DEMIRKOL, S., *Determining optimum tilt angles and orientation of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey*. Renewable Energy, vol. 29, pp.1265-1275. 2004.

KARIMOV KH. S., SAQIP M.A., AKHTER P., AHMED M. M., CHATTA J.A., YOUSAFZAI S.A., *A simple photo-voltaic tracking system*. Solar Energy Materials & Solar Cells, vol.87, pp.49-59. 2005.

MAVROMATAKIS, F., FRANGHIADAKIS, Y., *A highly efficient novel azimuthal heliotrope*. Solar Energy, vol.82, pp.336-442. 2008.

MOSALAN S.M.A., GHETTAS A., SABRY M., *V-Trough Concentrator on a Photovoltaic Full Tracking System in a Hot Desert Climate*. *Renewable Energy*, vol.6, no.5-6, pp.527-532. 1995.

OLIVEIRA M. M., *Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor solar azimutal*, Tese de mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008

OLIVEIRA, C. A. A., *Desenvolvimento de um Protótipo de rastreador Solar de Baixo Custo e sem Baterias*, Dissertação de Mestrado em Ciências – Centro de Tecnologia e Geociências, UFPE, Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares. 2007.

POULEK, V., LIBRA, M., *A new low-cost tracking ridge concentrator*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol.61, pp.199-202. 2000b.

POULEK, V., LIBRA, M., *A very simple solar tracker for space and terrestrial applications*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol.60, pp.99-103. 2000.

POULEK, V., LIBRA, M., *New solar tracker*". *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol.51, pp.113-120. 1998.

ROTH P., GEORGIEV A., BOUDINOV H., *Design and construction of a system for sun-tracking*, *Renewable Energy*, vol.29, pp.393-402. 2004.

SHAYANI, R. A., *“Medição do Rendimento Global de um Sistema Fotovoltaico Utilizando Módulos de 32 Células”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Faculdade de Tecnologia, UnB, Departamento de Engenharia Elétrica. 2006

VILELA O.C., FRAIDENRAICH N., TIBA C., *Photovoltaic pumping systems driven by tracking collectors. Experiments and simulation*. *Solar Energy*, vol.74, pp. 45-52. 2003.

2 Energia fotovoltaica

2.1 Introdução

O efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor produzida pela absorção de luz (FLOOD, 1986).

Em 1876 foi concebido o primeiro aparato fotovoltaico. Porém, somente em 1956 iniciou-se a produção industrial de células fotovoltaicas impulsionada pela corrida espacial. A crise energética de 1973 renovou e ampliou o interesse em aplicações terrestres. Hoje, com as questões ambientais, muitos esforços são aplicados no estudo das energias renováveis.

Em 1978, a produção de energia renovável atingiu a marca de 1 MWp/ano (megawatt de pico por ano) e em 1998, a produção mundial atingiu a marca de 150 MWp/ano, sendo o silício quase absoluto entre os materiais utilizados. O Silício, segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, tem sido explorado em diversas formas: monocristalino, policristalino e amorfo.

As técnicas de na produção das fotocélulas. Especialistas afirmam que a tecnologia de fabricação por filmes finos requerem menor quantidade de material e de energia filmes finos poderá chegar, a um custo de 1U\$/Wp (1/5 do custo praticado atualmente) (CASTRO, 2008).

Um dos grandes desafios atuais é o desenvolvimento de acessórios e equipamentos complementares para Sistemas Fotovoltaicos com qualidade e vida útil comparáveis às do módulo (Si-cristalino – 25 anos).

2.2 Revisão de literatura

2.2.1 Efeito fotoelétrico

Os materiais semicondutores possuem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução vazia. A separação entre estas duas bandas de energia (“*gap* de energia”) é da

ordem de 1,12 eV (equivalente a $1,6 \times 10^{-19}$ J) enquanto nos materiais isolantes é de vários eV. Fótons, na faixa da luz visível, com energia superior ao gap do material podem excitar elétrons da banda de valência para a banda de condução (CASTRO, 2002).

Um átomo de *silício* possui 4 elétrons de ligação que se ligam aos átomos vizinhos formando uma rede cristalina. Se for adicionado a esta rede átomos com 5 elétrons de ligação, como o *fósforo*, haverá um elétron em excesso, fracamente ligado ao átomo. Logo, com pouca energia pode-se deslocá-lo para a banda de condução. Diz-se que o fósforo é um dopante doador de elétrons e denomina-se *dopante n* ou *impureza n* (DONALD, 2002).

Se adicionarmos a esta rede, átomos com 3 elétrons de ligação, como o *boro*, haverá um elétron em falta. Esta falta de elétrons é denominada buraco ou lacuna. Logo, com pouca energia pode-se deslocar um elétron de uma região vizinha para esta lacuna. Diz-se que o boro é um dopante receptor de elétrons e denomina-se *dopante p* ou *impureza p*.

À temperatura ambiente, existe energia suficiente para que praticamente todos os elétrons em excesso no fósforo estejam livres e para que todas as lacunas nos átomos de boro possam se deslocar;

Partindo de um silício puro e introduzindo em uma face átomos de boro e em outra átomos de fósforo, forma-se uma *junção pn*. Nesta junção os elétrons livres do lado n migram para o lado p, criando-se uma falta de elétrons no lado n e um aumento de elétrons no lado p. Este processo alcança o equilíbrio quando o campo elétrico criado impede a passagem de elétrons livres remanescentes no lado n (CASTRO, 2002).

Se a junção for exposta a fótons com energia maior que o gap, ocorrerá uma geração de pares elétrons-lacuna dando origem a uma diferença de potencial (efeito fotoelétrico).

Um fator limitador do processo de conversão de energia solar em eletricidade é o seu espectro de radiação. Apenas uma parcela deste espectro, em uma faixa inferior a $1\mu\text{m}$ é capaz de excitar os elétrons em células de silício. Outro fator limitador é que cada fóton só consegue excitar um elétron. Logo, fótons com energia maior que a energia do *gap* haverá um excesso de

energia que será transformado em calor, que poderá prejudicar o funcionamento da fotocélula. Além disto, nem todos os elétrons excitados contribuirão para a corrente. Em células de silício o limite teórico de conversão é de 27%.

Um sistema solar fotovoltaico compreende um agrupamento de células em painéis fotovoltaicos e de outros equipamentos que transformam ou armazenam a energia elétrica para que esta possa ser utilizada em várias aplicações finais.

A célula solar é a unidade de conversão do módulo. Uma célula, contudo produz muito pouca energia, tensão em torno de 0,4 V e densidade de corrente da ordem de $30\text{mA}/\text{cm}^2$. O módulo fotovoltaico é a unidade básica de todo o sistema, Figura 2.1. Este é composto por células conectadas em arranjos produzindo tensão e corrente suficientes para a utilização da energia.

Os painéis disponíveis comercialmente têm eficiência de 12 a 16%, podendo ser fabricados com silício monocristalino, policristalino ou amorfo.

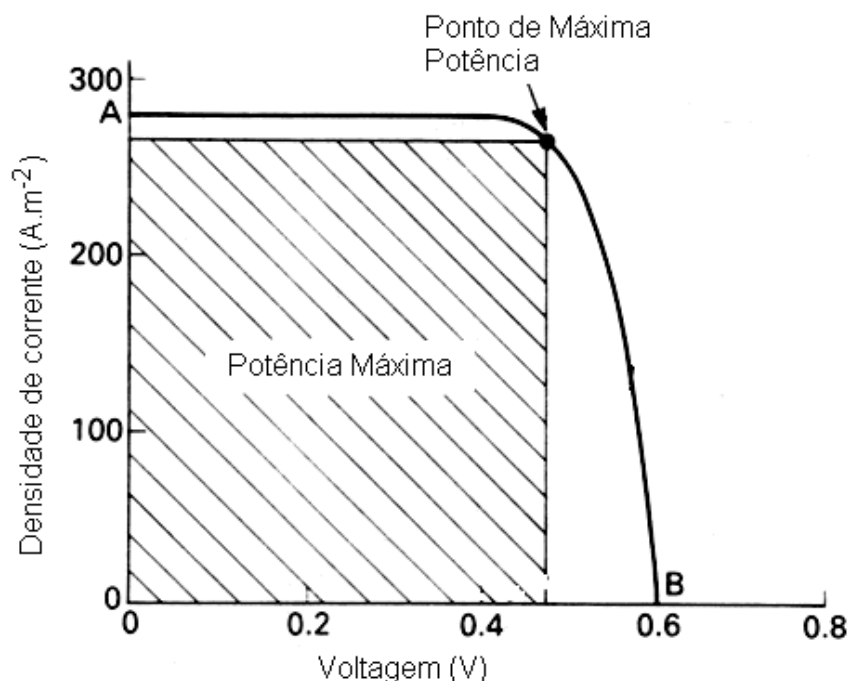


Figura 2.1: Características de uma curva Corrente x Tensão em painéis fotovoltaicos. Fonte ASTM.

2.2.2 Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

A potência de um módulo fotovoltaico é expressa pela potência de pico (Wp), especificada em condições padrões de teste (“STC – Standard Test Conditions”): radiação de 1000 W/m^2 , temperatura de 25°C e massa de ar de 1,5 (distancia que a luz percorre na atmosfera, massa de ar igual a 1 significa uma atmosfera).

- Os módulos apresentam uma característica própria que relacionam tensão nos seus terminais em função da corrente drenada pela carga;
- Tensão a vazio (V_{oc}): tensão nos terminais quando a corrente de carga é nula;
- Corrente de curto-circuito (I_{cc}): corrente quando os dois terminais são curto-circuitados (tensão terminal nula);
- Para cada ponto da curva $I \times V$, o produto $V \cdot I$ representa a potência gerada que atinge um máximo (P_{max}) num dado valor de tensão (V_{mP}) e de corrente (I_{mP});

Os cinco parâmetros (V_{oc} , I_{cc} , P_{max} , V_{mP} e I_{mP}) são normalmente especificados pelo fabricante sob determinadas condições de temperatura, radiação e massa de ar. A Figura 2.2 mostra a curva de potência sobreposta a curva tensão versus corrente para um painel fotovoltaico.

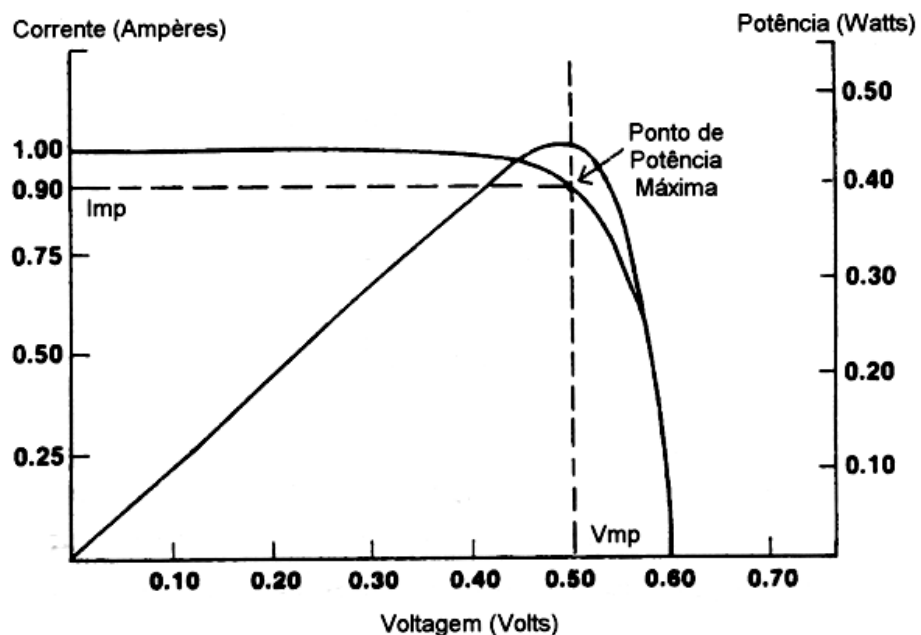


Figura 2.2: Ponto de máxima potência. Adaptado de LIM & HAMILL, 2000.

O fator de forma (ou de preenchimento): é uma grandeza que expressa o quanto o retângulo da curva característica se aproxima de um quadrado no diagrama I x V. Quanto melhor a qualidade das células mais próximo da unidade será este fator (CREST, 2009).

$$F = \frac{V_{mP} I_{mP}}{V_{oc} I_{cc}} \quad (2.1)$$

em que,

V_{mP} = Tensão máxima de pico, dada em V;

I_{mP} = Corrente máxima de pico, em A;

V_{oc} = Tensão de circuito aberto, em V;

I_{oc} = Corrente de curto circuito, em A.

Eficiência do módulo:

$$\eta = \frac{V_{mP} I_{mP}}{I_G A} \quad (2.2)$$

em que,

I_G = irradiância solar incidente sobre o painel fotovoltaico, em W/m^2 ;

A = área do painel, em m^2 .

Fatores que afetam as características da curva I x V:

- Intensidade de radiação: a corrente gerada pelo módulo cresce linearmente com a intensidade luminosa;
- Temperatura: a tensão gerada diminui significativamente com o aumento da temperatura e, portanto a eficiência do módulo também reduz;

Modelo matemático:

O circuito equivalente da célula fotovoltaica pode ser mostrado na Figura 2.3 e consiste em um gerador de corrente contínua (corrente fotogerada) em paralelo com a junção pn que atua como um diodo polarizado positivamente e em série com uma resistência elétrica.

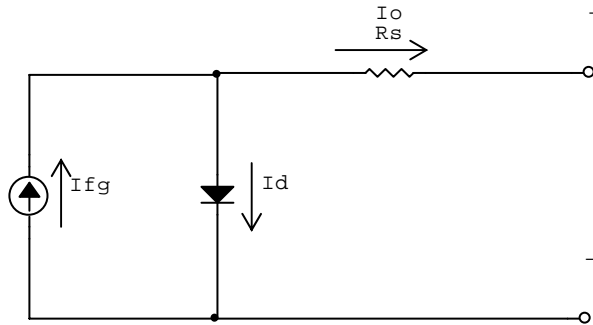


Figura 2.3: Circuito equivalente de um painel fotovoltaico.

A corrente que é fornecida à carga (I_o) é, portanto a diferença entre a corrente fotogerada (I_{fg}) e a corrente no diodo (I_{dd}) Equação 2.3 (OLIVEIRA, 2008).

$$I_o = I_{fg} - I_{dd} \quad (2.3)$$

A corrente no diodo vale (KITTEL, 1978):

$$I_{dd} = I_{sr} \left[e^{\frac{q \cdot V_d}{F_i K T}} - 1 \right] \quad (2.4)$$

em que:

I_{sr} = corrente de saturação reversa do diodo, em A;

V_d = tensão nos terminais da junção pn, em V;

q = carga elementar ($1,6 \times 10^{-19}$ C);

k = constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J K⁻¹);

F_i = fator de idealidade que depende do material utilizado e varia entre 1 e 2, adimensional;

T = temperatura da célula, em K.

A corrente I_{sr} depende fortemente da tensão na célula, sendo também afetada pela temperatura da célula e pode ser expressa pela Equação 2.5 (CASTRO, 2008).

$$I_{sr} = I_{sro} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \left[e^{\frac{q \cdot E_{go}}{F_i k} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right)} - 1 \right] \quad (2.5)$$

em que:

I_{sr0} = corrente de saturação reversa na temperatura T_r , ($\cong 5\mu A$);

T_r = temperatura de referência, em kelvin (normalmente 298 K);

E_{g0} = diferença de potencial do silício (1,1 V);

A corrente fotogerada varia de forma diretamente proporcional à quantidade de irradiação solar incidente sobre a célula e à área da célula iluminada:

$$I_{fg} = \frac{R_g}{1000} [I_{cc} - k_t (T - T_r)] \quad (2.5)$$

Acrescentando a queda na resistência série da célula, R_s , a expressão da corrente fornecida vale:

$$I_o = I_{fg} - I_{sr} \left[e^{\frac{q \cdot (V_o - R_s \cdot I_o)}{F_i k T}} - 1 \right] \quad (2.6)$$

Como já foi dito, a potência fornecida por uma célula é da ordem de poucos Watts sob as melhores condições de temperatura e irradiação. Logo é comum um arranjo de várias células em série na composição de um módulo e de vários módulos em série e em paralelo em um único painel.

2.3 Objetivos

Neste capítulo, descreve-se metodologia e os resultados da avaliação dos efeitos do rastreamento solar na resposta de painéis fotovoltaicos submetidos a uma mesma carga.

Objetivou-se com este trabalho comparar a produção energética de um sistema de geração fotovoltaica instalado em uma estrutura fixa com outro sistema de geração, fazendo-se uso de um seguidor solar com movimento em dois eixos.

Objetivos específicos:

- I. Instalar um painel fotovoltaico em suporte fixo com inclinação de $20^\circ 48' 35''$;
- II. Instalar um painel em suporte móvel, movido por sistema de rastreamento solar;
- III. Apresentar uma metodologia para verificar o aumento da produção energética de um sistema fotovoltaico autônomo com

- rastreador de áreas mais claras no céu em relação a um sistema fixo;
- IV. Verificar em quais períodos do dia há uma maior produção energética do painel fotovoltaico móvel em relação ao fixo;
 - V. Examinar o funcionamento do equipamento com diferentes índices de radiação solar direta.

2.4 Material e métodos

Neste item é apresentada a metodologia e os materiais empregados para efetuar as medições de radiação global, nos painéis fotovoltaicos fixo e móvel, tensão e corrente fotogerada pelos painéis em estudo.

O objetivo é determinar por meio da análise de dados coletados pelo conjunto de sensores o aumento de rendimento (ganho energético) de um sistema de seguimento autônomo em relação a um sistema fixo com orientação norte (hemisfério sul) fixa e igual à latitude local. Para esta finalidade foi desenvolvido um seguidor solar de baixo custo e fácil instalação. O equipamento construído usou recursos simples de mecânica (polias, barra rosqueada, rolamentos, motores e circuito de controle.) e controle eletrônico eficiente, baseado em um micro-controlador (PIC 16F877A).

Nesta parte do experimento foram utilizados dois painéis fotovoltaicos, uma placa de aquisição de dados, sensores de radiação e temperatura.

O painel fixo foi instalado a dois metros e vinte centímetros do solo com uma inclinação de $20^{\circ}48'35''$ com sua face voltada para norte.

O painel móvel foi colocado a três metros do solo e sua face voltada para céu sofria variação em sua posição e altura (podendo a altura variar de dois a três metros), graças a ajuda de um rastreador. Figura 2.4.



Figura 2.4: Painel fotovoltaico móvel preso ao coletor concentrador.

Foi montado um sistema de aquisição de dados usando uma placa de aquisição de dados NIPCI4351 da NI (National Instruments), que fez a varredura e a leitura de todos os sensores e instrumentos empregados neste experimento. O armazenamento e gerenciamento do sistema foram feitos por um computador pessoal (PC) utilizando o software VI LOGGER também da NI.

A descrição dos sensores e equipamentos utilizados se encontra no Quadro 2-1.

Quadro 2-1: Lista de equipamentos de sensores usados na coleta de dados.

Equipamento	Especificação Técnica
Piranômetro	Kipp & Zonen Radiação Global 1000 $W.m^{-2}$ (± 30) $W.m^{-2}$
CM3 piranômetro	Kipp & Zonen Radiação Global 2000 $W.m^{-2}$ (± 25) $W.m^{-2}$
Placa NIPCI4351	-8 TTL Digital I/O linhas -resolução 24-bit ADC -16 entradas para medidas de tensão ou 14 para termopares ate 60 leituras por segundo -Autozero e compensação de junção fira
Adaptador TBX-68T	-68 pinos montados em bloco -14 entradas independentes para termopares -isotérmico design - Autozero e junção fira embutido
Microcomputador	Athlon 2000+

O modelo dos módulos fotovoltaicos utilizados é KC60 da Kyocera. Foram montados dois módulos. O painel fixo foi instalado no Departamento de

Engenharia Agrícola Área Experimental. O outro foi fixado ao coletor concentrador, apresentado no capítulo 3. Todo esse conjunto se movimentava por meio de dois motores controlados pelo sistema de rastreamento, desenvolvido para este trabalho.

As características deste painel fotovoltaico são especificadas no Quadro 2-2, os valores elétricos são para uma massa de ar de 1.5, temperatura da célula de 25°C e irradiação de 1000Wm⁻².

Quadro 2-2: Características nominais do módulo KC60. Fonte: http://kyocerasolar.com.br/site/pdfs/KC60_br.pdf

Potência máxima ($P_{m\acute{a}x}$)	60 W
Tensão de máxima potência (V_{mp})	16,9 V
Corrente de máxima potência (I_{mp})	3,55 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	21,5 V
Corrente de curto circuito (I_{sc})	3,73 A
Dimensões	751mm x 652mm x 52mm
Peso	7,8 kg

A montagem dos módulos fotovoltaicos, móvel e fixo e as ligações dos equipamentos, sensores, cargas, sistema de aquisição e gerenciamento é ilustrado na Figura 2.5.

A tensão V_2 , gerada pelo painel fotovoltaico, foi medida diretamente nos terminais dos painéis, fixo e móvel; a tensão V_1 medida no resistor de precisão R_o e, a partir desta, tem se a corrente fotogerada que percorre o circuito. Utilizou se uma resistência (4800W, 127V) como carga em cada painel fotovoltaico e não foram feitas correções de temperatura.

Foram utilizados três sensores de radiação, CM3 kipp & zonen, sendo que um destes foi instalado na posição horizontal para coleta de dados de radiação global incidente sobre uma superfície horizontal, o outro foi preso a um painel fotovoltaico móvel para coleta de dados de radiação global incidente sobre este painel. Ainda, foi utilizado um sensor de radiação CM3 colocado junto ao painel fotovoltaico fixo com inclinação igual à latitude local. Os dados de radiação foram coletados e comparados e apresentam diferenças menores que as diferenças de eficiência registradas entre os painéis fixo e móvel.

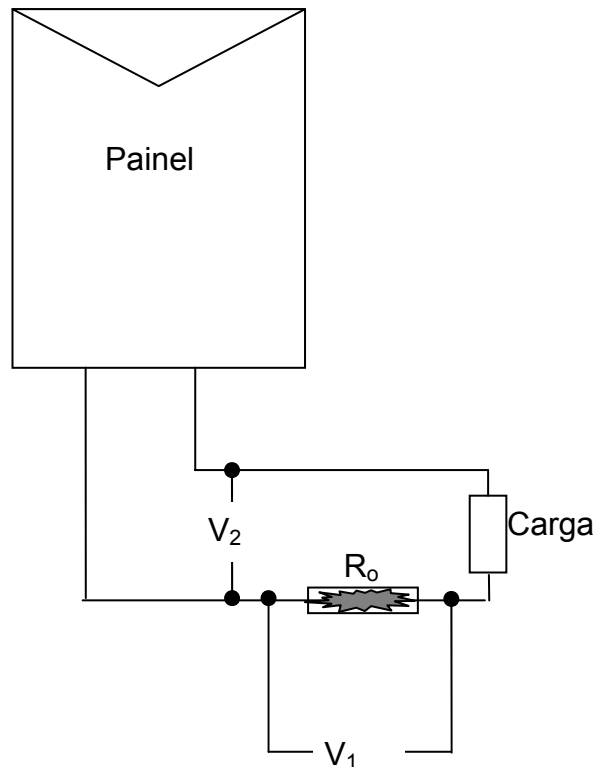


Figura 2.5: Detalhes da montagem do experimento.

Todos os termopares (usados no capítulo 3) e sensores foram ligados ao dispositivo TBX-68T e este conectado à placa de aquisição de dados, NIPCI4351. As leituras e armazenamento de dados foram feitas a uma taxa de três medidas por segundo.

Para estudo foram coletados dados de tensão e corrente dos dois painéis fotovoltaicos, sendo a tensão medida com sensibilidade de micro volt e os erros de medida na corrente eram de 2%. Assim, pode se calcular a potência dos painéis por meio da Equação 2.7.

$$P = V \cdot I \quad (2.7)$$

em que,

P = potência fornecida pelo painel à carga, em W;

V = Tensão fotografada, em V;

I = intensidade da corrente elétrica no circuito, em A.

A intensidade da corrente elétrica foi obtida utilizando-se da tensão medida no resistor de precisão (2%), ficando afetada pela precisão deste componente causando um desvio no valor obtido para a potência.

O método utilizado para análise de incertezas é o de Kleine e McClintock

[KLINE, 1985]; onde o resultado do cálculo da incerteza das medidas de F é uma função das variáveis independentes $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, ou seja, (Equação 2.8):

$$F = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2.8)$$

Chamando ΔF de incerteza do resultado e $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_n$ as incertezas das variáveis independentes tem-se a Equação 2.9:

$$\Delta F = \left[\left(\frac{\partial F}{\partial x_1} \Delta_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} \Delta_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_3} \Delta_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_n} \Delta_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.9)$$

Como a equação é uma soma quadrática, valores pequenos de incerteza podem ser desprezados na presença de valores maiores, pois terão pouca influência no resultado final.

Para incerteza da medida da irradiância global (I_G), foram consideradas as incertezas associadas ao piranômetro (fornecida pelo manual) e ao instrumento de medida. Como o instrumento de medida utilizado foi o NIPCI4351, o erro relativo a este instrumento pode ser desconsiderado devido a alta precisão de suas medidas. Então o valor da radiação global valor é dado por:

$$I_G = (I_{G \text{ medido}} \pm \Delta I_G) \quad (2.10)$$

em que,

ΔI_G = erro intrínseco do sensor, fornecido pelo manual, $W.m^2$.

Como a intensidade da corrente elétrica é dada pela razão entre a tensão no resistor e a resistência do resistor de precisão, veja a Equação 2.11.

$$I = \frac{V_1}{R_0} \quad (2.11)$$

em que,

V_1 = tensão no resistor de precisão, medida em V;

R_0 = resistência do resistor de precisão, medida em Ω .

Os desvios nos valores da intensidade da corrente elétrica foram obtidos usando-se o método da propagação de incertezas de Kleine e McClintock. Assim, a incerteza na intensidade da corrente elétrica será determinada pela Equação 2.12.

$$\Delta I = \left[\left(\frac{\partial I}{\partial V_1} \Delta V_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial R_o} \Delta R_o \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

em que,

R_o = resistor de precisão, com resistência de 0,33Ω;

I = intensidade da corrente elétrica, em A;

ΔI = desvio na medida da corrente, em A;

ΔV_1 = desvio na medida da tensão no resistor, em V;

ΔR_o = erro do resistor, $\pm 0,0066 \Omega$.

Como a incerteza na medida da tensão é muito menor que o erro da resistência do resistor, esta pode ser desprezada e a Equação 2.12 se reduz à Equação 2.13.

$$\Delta I = \pm \frac{V_1 \Delta R_o}{R_o^2} \quad (2.13)$$

Então, a intensidade da corrente elétrica no circuito será dada pelo valor encontrado na Equação 2.12 acrescido do seu respectivo desvio, dando origem a Equação 2.14.

$$I = \frac{V_1}{R_o} \left(1 \pm \frac{\Delta R_o}{R_o} \right)$$

$$I = \frac{V_1}{R_o} (1 \pm 0,02) \quad (2.14)$$

A potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos será dada pela potência calculada através de dados medidos acrescida de seu respectivo desvio, Equação (2.15).

$$P = P_{medida} \pm \Delta P \quad (2.15)$$

em que,

P_{medida} = potência calculada através de dados medidos, em W;

ΔP = desvio da potência, em W.

Utilizando-se o método de análise de incertezas de Kleine e McClintock e desconsiderando-se a incerteza da tensão chega-se a Equação 2.16.

$$\Delta P = \left[\left(\frac{\partial P}{\partial V} \Delta V \right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial I} \Delta I \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\Delta P = \sqrt{(I \cdot \Delta V)^2 + (V \cdot \Delta I)^2}$$

$$\Delta P = \sqrt{\left(\frac{V_1}{R_0} \Delta V \right)^2 + \left(V \frac{V_1 \Delta R_0}{R_0^2} \right)^2}$$

$$\Delta P = \pm V \frac{V_1 \Delta R_0}{R_0^2}$$

$$P = V \frac{V_1}{R_0} (1 \pm 0,02) \quad (2.16)$$

Assim, todos os resultados apresentarão um erro de 2% devido ao método empregado na medida da intensidade da corrente elétrica no circuito.

2.5 Resultados e discussão

Na Figura 2.6, pode se observar a eficiência relativa entre o painel móvel e fixo e que o painel fotovoltaico seguidor tem uma eficiência, em média, 48% maior em relação ao painel fixo. Neste gráfico foram colocadas duas setas apontando para descontinuidades na curva. Estas foram causadas por interrupções indesejadas na coleta de dados devido à falta de energia e, conseqüentemente, ao desligamento do sistema de aquisição de dados.

A partir das dezesseis horas, a eficiência relativa cresceu exageradamente graças a uma formação de nuvens que bloqueou a radiação sobre o painel fixo.

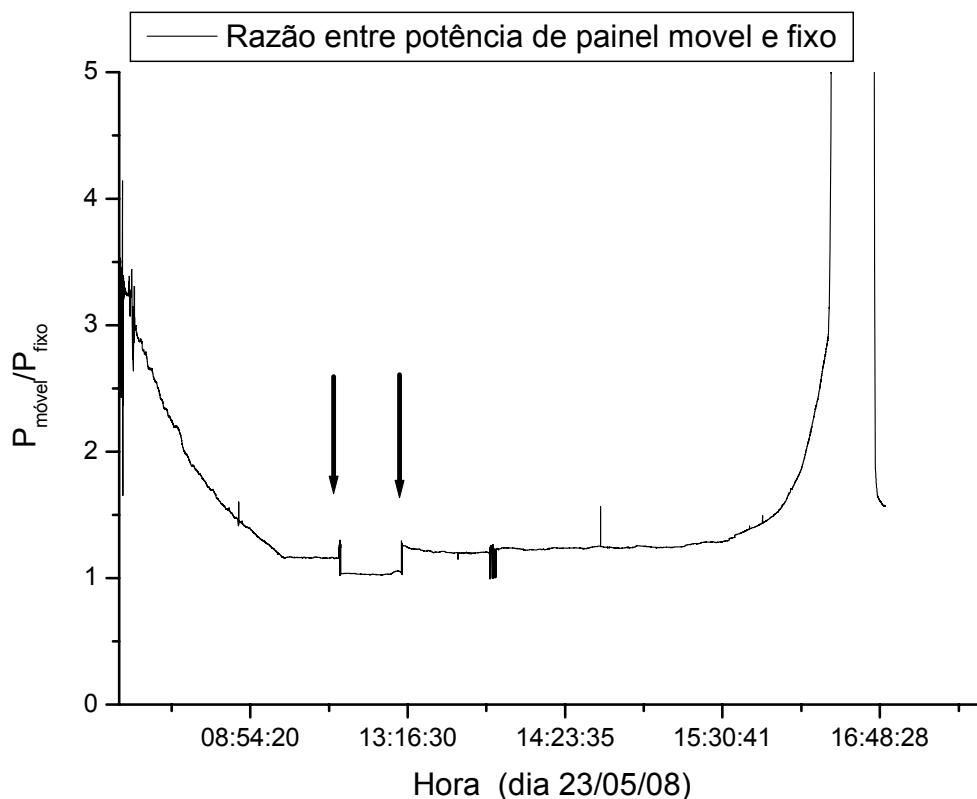


Figura 2.6: Razão entre as potências dos painéis Fixo e Móvel, para o dia 23 de maio de 2008.

Dentre os dias de coleta de dados, o dia 24 de maio foi o melhor dia de insolação, quase sem formação de nuvens, A Figura 2.7 mostra a potência fornecida por cada painel neste dia. Pode se perceber que o painel móvel apresenta melhor rendimento em relação ao fixo durante todo o dia mas, ao nascer e ao pôr do sol, o rendimento do painel móvel é muitas vezes maior que o rendimento do painel fixo.

A eficiência média do painel móvel superou a eficiência média do painel fixo somente em 46%. Foi o dia de pior rendimento relativo registrado durante o experimento, mostrando que o fotovoltaico rastreador tem melhor eficiência relativa nos dias em que aparecem nuvens com maior frequência.

Um gráfico semelhante ao mostrado na Figura 2.6 seria obtido plotando-se a razão entre as potências geradas pelos painéis fotovoltaicos móvel e fixo respectivamente.

Para o dia 25 de maio, o aumento médio de eficiência relativa do painel

móvel foi de 50%. Os resultados são mostrados graficamente na Figura 2.8.

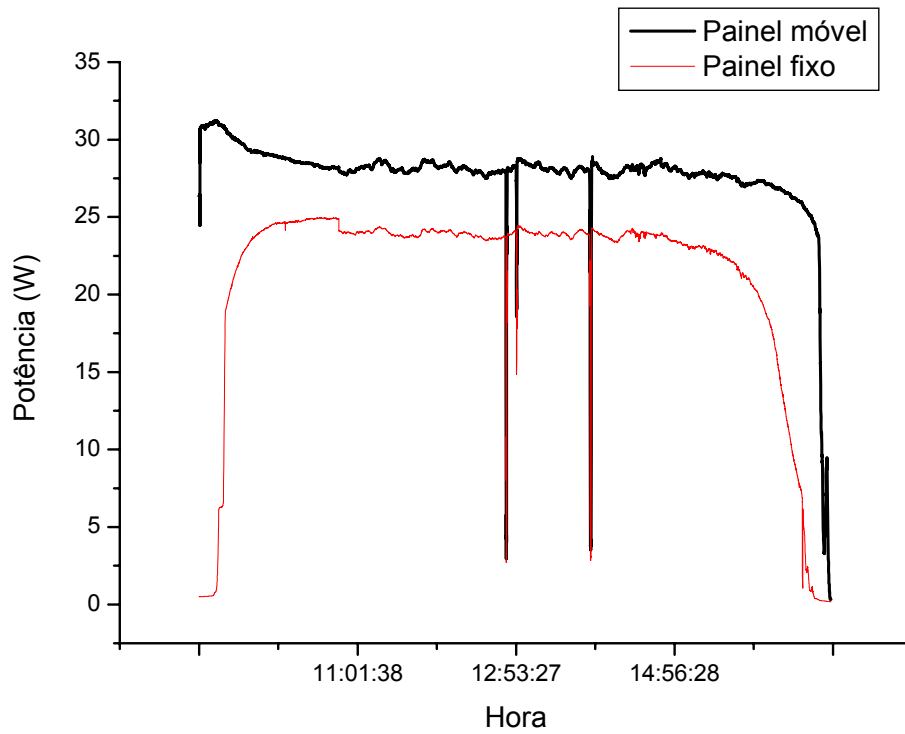


Figura 2.7: Potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos em 24 de maio, 2008.

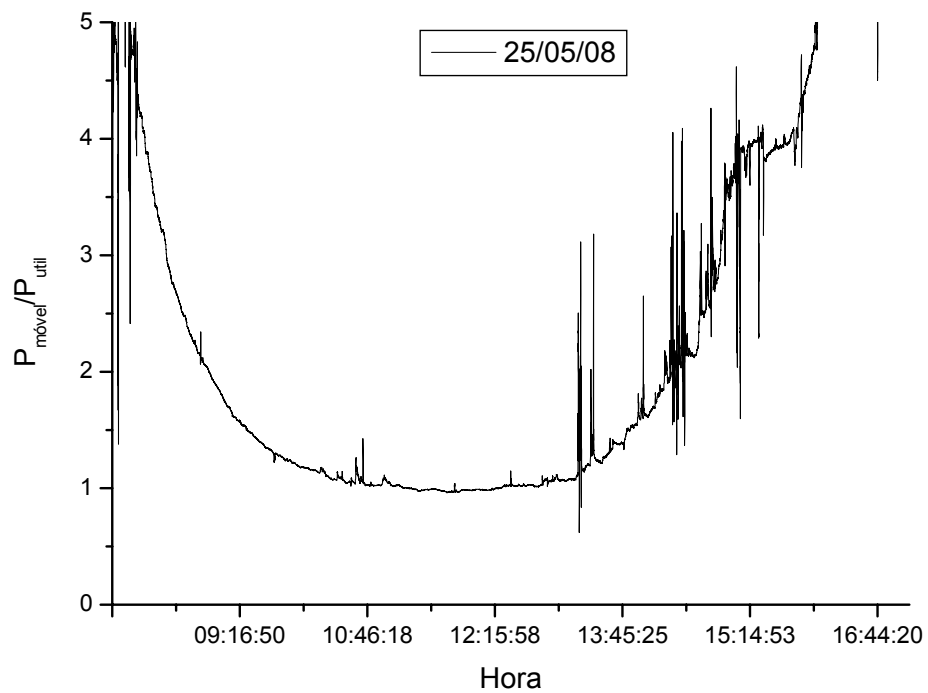


Figura 2.8: Razão entre as potências dos painéis fixo e móvel para o dia 25 de maio de 2008.

Os picos e vales representam instantes em que a potência relativa dos painéis é muito diferente. Os picos acima da curva ocorrem, por exemplo, quando acontece formação de nuvens cobrindo o painel fixo antes do móvel ou quando o painel móvel está voltado para uma região de maior incidência de radiação. Os picos abaixo da curva geralmente aparecem quando as condições de iluminação mudam e o rastreador começa a correção na orientação do painel móvel e por alguns instantes há uma queda no rendimento relativo como pode se observar nos gráficos mostrados nas Figuras 2.8, 2.9 e 2.11.. O gráfico mostrado na figura 2.9 foi gerado com dados registrados no dia 03/06/2008 e o seguimento aumentou o rendimento do conjunto móvel em 59% em relação ao fixo.

No dia 04/06/2008, a nebulosidade foi bastante acentuada como mostra o Gráfico da Figura 2.10 e o comportamento do painel seguidor atendeu às expectativas pois teve um rendimento médio 70% melhor que o painel fixo.

Mesmo sem radiação direta o seguidor fez o acompanhamento do Sol sempre que houve janelas de radiação capazes de sensibilizar o sensor ótico do equipamento.

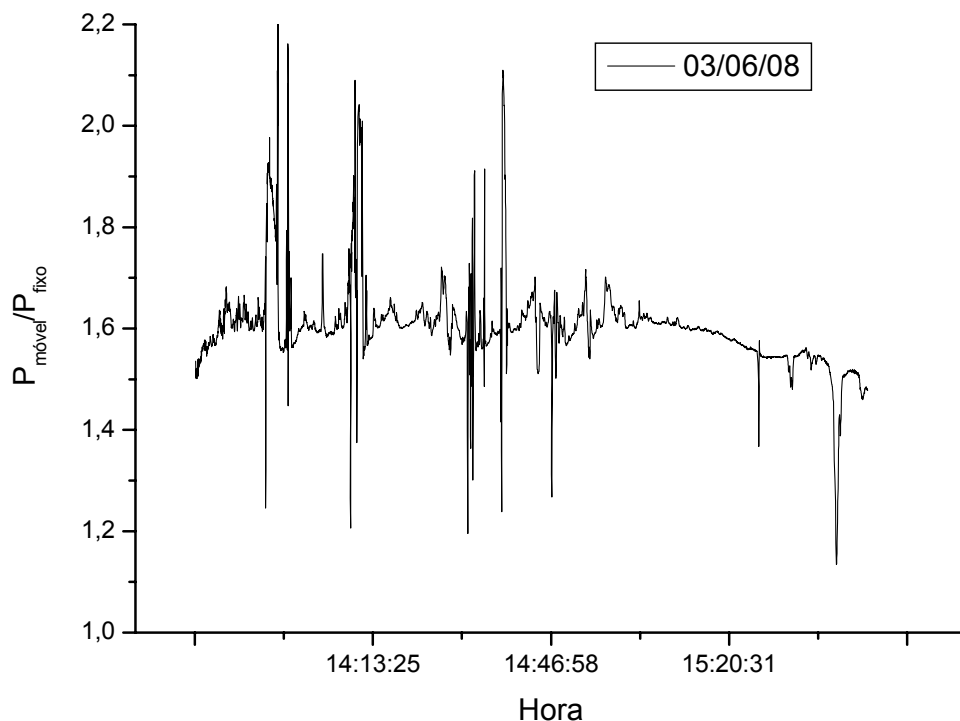


Figura 2.9: Razão entre as potências dos painéis fixo e móvel para o dia 03 de junho de 2008.

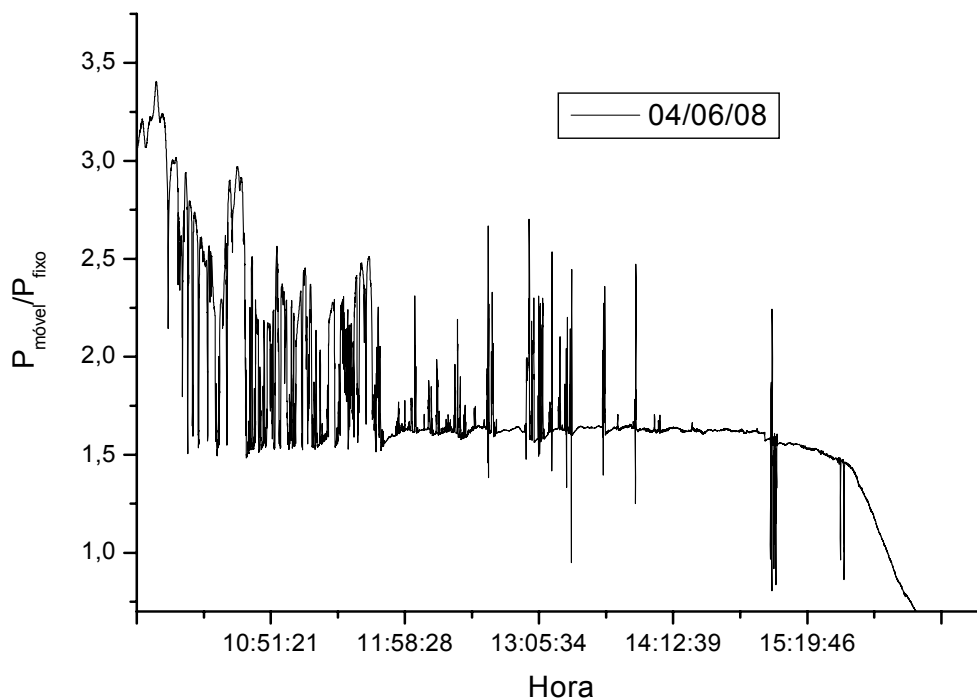


Figura 2.10: Razão entre as potências dos painéis fixo e móvel para o dia 07 de junho de 2008.

As curvas apresentadas no Gráfico da Figura 2.11 mostram a intensidade de radiação global sobre três superfícies; horizontal, inclinada e outra móvel no dia 24/05/2008. Do amanhecer até 11h00min e na parte da tarde, das 13h00min ao pôr-do-sol, a diferença entre a intensidade de radiação nestas superfícies se destaca pois o ângulo de incidência direta nelas é diferente. Entre 11h00min e 13h00min as curvas da superfície móvel e fixa se aproximam bastante e tendem a se interceptar (o azimute do painel fixo e do solar estão próximos). Ainda em relação à Figura 2.11, é importante observar que houve uma interrupção na coleta de dados de aproximadamente 01h40min na parte da manhã.

Quando houve uma formação de nuvens muito intensa, o sistema procurou regiões mais claras no céu e quando as nuvens desapareceram, gastou se aproximadamente uma hora para voltar às condições ideais de operação pois o rastreador orientou o sistema para uma região diferente daquela que se encontrava o sol.

Observou se que o ganho do sistema móvel vai além do ganho de energia incidente sobre ele. Isso se deve a ótica geométrica pois se um feixe

de luz incide perpendicularmente sobre uma superfície (vidro, por exemplo) uma quantidade ínfima de radiação é refletida. Praticamente toda a radiação incidente sobre o painel fotovoltaico móvel é transmitida às células fotovoltaicas. Quando o ângulo de incidência, medido em relação á normal, é muito grande uma boa parcela da radiação é refletida pelo vidro do painel fotovoltaico.

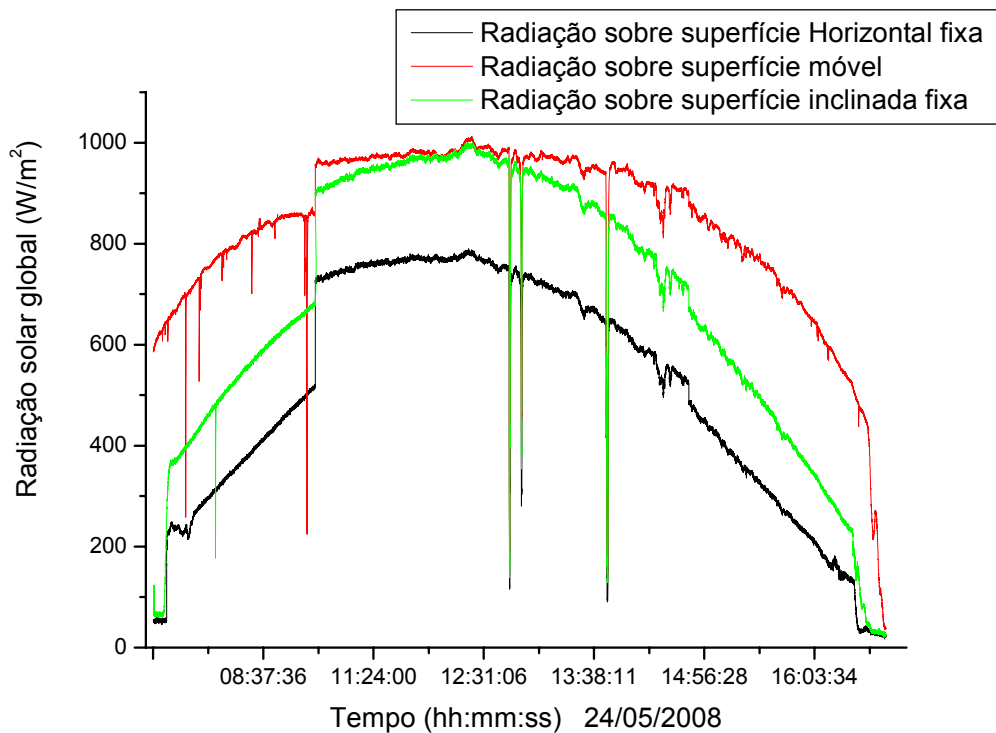


Figura 2.11: Intensidade de radiação global sobre uma superfície horizontal, painel fixo e painel móvel no dia 24/05/2008.

Pequenos sistemas fotovoltaicos (usados em residências e escolas) poderiam se beneficiar desta tecnologia, mas algumas falhas do equipamento exigiriam manutenção e isto poderia inviabilizar o investimento de produção energética. Neste caso, o aumento do número de módulos instalados em uma estrutura fixa seria o mais recomendado. Para sistemas autônomos médios e de grande porte, equipamentos de seguimento poderiam auxiliar na redução de custos de implantação, pois seria possível diminuir o número de módulos fotovoltaicos instalados e, dependendo da produção energética do sistema, o valor da energia poderia cair significativamente.

Pode se afirmar que o tipo de rastreamento utilizado neste trabalho garante uma melhora significativa nos painéis fotovoltaicos tanto no ponto de vista energético como econômico, uma vez que a melhora no rendimento do sistema fotovoltaico implica em menores investimentos iniciais (instalação).

2.6 Análise econômica

O custo de investimento de sistemas fotovoltaicos é normalmente referido ao *custo do Watt de pico* ($U\$/W_p$), em que a potência de pico é a potência máxima nas condições de referência (DOE – Department of Energy). O custo inclui tanto os módulos propriamente ditos como os dispositivos de interface e regulação entre os coletores e a carga ou a rede. Estes dispositivos (CERDEIRA & ALVES, 2001) são tipicamente a bateria, o regulador de carga e o inversor de frequência para sistemas ligados à rede. Eventualmente, para sistemas isolados. As estruturas de suporte dos módulos também se incluem nos dispositivos de interface e regulação.

Atualmente, o preço de mercado do *Watt de pico* dos sistemas fotovoltaicos varia de R\$10,00 a R\$20,00.

Embora o custo dos dispositivos de interface e regulação e os custos de instalação possam variar muito, pode se afirmar que, em termos médios, cerca de 50% do investimento total se refere aos coletores, incluindo se nos 50% restantes o custo de ligações elétricas, instalação e dispositivos de interface e regulação (CASTRO, 2002).

Com este sistema de rastreamento pode se rastrear até cinco painéis fotovoltaicos de 60W, com potência de pico total de 300W. Analisando-se o pior resultado (aumento de eficiência de 46%), o rastreamento proporcionaria uma redução de dois painéis fotovoltaicos (R\$3000,00). Como o custo do rastreador é de R\$680,00, já se consegue redução nos custos de instalação. Esta economia na instalação, além de proporcionar certo conforto ao minimizar os custos iniciais, é suficiente para a manutenção do sistema rastreador.

Considerando-se que a vida útil dos painéis é em média de 20 anos e do sistema rastreador de 10 anos o custo de instalação já se torna menor que aquele executado sem rastreador, dando a viabilidade econômica ao sistema fotovoltaico rastreador.

2.7 Conclusões

O seguidor solar funcionou satisfatoriamente tanto em dias com alta radiação solar direta como em dias parcialmente nublados. O sistema de controle identificou corretamente as situações de alta e baixa radiação direta e se posicionou sempre voltado para a região mais clara do céu (muitas vezes voltado para o sol). Num dia muito nublado ocorreu um atraso na orientação, pois os sensores procuravam regiões mais claras no céu deixando de seguir o sol.

A metodologia usada para medir o ganho energético do sistema móvel em relação ao fixo foi adequada. Pôde-se verificar o aumento total de produção energética, bem como os períodos de maior rendimento do conjunto móvel em relação ao fixo.

Em dias de menor radiação direta o sistema rastreador apresentou maior rendimento em relação ao fixo.

O sistema de rastreamento não eleva a eficiência dos painéis fotovoltaicos mas contribui significativamente no aumento de produção energética, conforme mostrou o experimento.

A breve análise de simulações feitas no *mathematica* para diferentes latitudes indicou que o rastreamento apresentou ganhos que sugerem estudos mais adequados com dados reais e relacionando latitude e inclinação.

Os objetivos propostos para este trabalho foram alcançados, mas ficam as seguintes sugestões para futuros estudos:

- 1) Repetir o experimento variando a carga nos painéis afim de avaliar influências da carga sobre os sistemas.

- 2) Utilizar a metodologia de comparação entre sistemas com seguimento solar e fixo por um período longo (anual), para uma análise de rendimento energético durante os meses e estações do ano.

- 3) Adequar esta metodologia para analisar o sistema de seguimento solar em relação a um sistema fixo, mas ambos conectados diretamente na rede elétrica.

- 4) Desenvolver um software que faça simulações com dados de radiação solar (gerados por software ou medidos) para determinar o ganho energético de uma superfície em movimento em relação a superfícies fixas

para qualquer geometria de seguimento solar que contemple os diversos parâmetros para estudos, tais como, inclinação, latitude, índices de claridade, refletância, sombreamento e etc. O programa poderia ser aplicado em diversos projetos na área de ambiência e energia solar (térmica e fotovoltaica).

2.8 Bibliografia

ASTM E1036M-96e2 *Standard Test Methods for Electrical Performance of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells*, American Society for Testing of Materials (www.astm.org)

CASTRO R. M. G., *Energias renováveis e produção descentralizada: introdução a energia fotovoltaica*, Universidade Técnica de Lisboa, 2002

CASTRO R. M. G., *Energias renováveis e produção descentralizada: introdução a energia fotovoltaica*, Universidade Técnica de Lisboa, 2ª edição, 2008

CERDEIRA A., ALVES M., *Maximização da energia fornecida por um painel fotovoltaico*, Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal, 2001

CREST, *United States Department of Energy, Center for Renewable Energy and Sustainable Technology, Aurora educational*, <http://aurora.crest.org/>, acessado em janeiro de 2009.

DOE, *US Department of energy, photovoltaics*, <http://www.eren.doe.gov/pv/>

DONALD A. N., *Semiconductors physics and Devices: basic principles*, McGraw-Hill, 3ª edição, 2002

FLOOD, M., *Solar cells, Design and Innovation*, Open University Press (1986) 56.

KENNETH G. N., EDWARD V. V., *Transistor Physics*, Chapman and Hall, 1973

KITTEL C., *Introdução à Física do Estado Sólido*. Editora Guanabara Dois S.A. – Rio de Janeiro, RJ, 5ª edição, 1978.

KLINE, S.J., *The purpose of uncertainty analysis*. Journal of Fluids Engineering, vol.107, 1985.

LIM Y. H., HAMIL D. C., *Simple maximum power point tracker for photovoltaic*, *Electronics Letters*, vol 36, 2000

OLIVEIRA M. M., *Análise do desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor solar azimutal*, Tese de mestrado, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008

3 Coletor solar concentrador

3.1 Introdução

A conservação e o uso racional de energia renovável, de baixo custo e não poluente, como aquecimento de água com aproveitamento da energia solar, têm sido a preocupação constante nos projetos e no gerenciamento dos sistemas prediais. O consumo com o aquecimento de água representa uma parcela significativa da energia gasta em edificações residenciais. Prado & Gonçalves (1992); afirmaram que nestas instalações o consumo de energia devido ao chuveiro elétrico, é de 32%.

Os sistemas de aquecimento direto por meio de coletores solares planos têm sido utilizados em nosso país, principalmente em residências isoladas, há mais de duas décadas, aproveitando a energia potencial do reservatório superior e o efeito de termossifonagem para a movimentação da água nos coletores.

Nestas aplicações, a capacidade do reservatório adotada varia entre uma a duas vezes o valor do consumo diário médio estimado. Para compensar eventuais dias de insolação insuficiente, a fonte de calor auxiliar comumente utilizada é uma resistência elétrica inserida no reservatório.

A circulação por termossifonagem ocorre devido à diferença de densidade do fluido aquecido no coletor e do fluido de temperatura mais baixa armazenado na parte inferior do reservatório. Observando as condições em que devem ser instalados os coletores em relação ao reservatório e os respectivos tubos de ligação, no que diz respeito ao desnível e isolamento destas tubulações, para o bom funcionamento do termossifão (VAXMAN & SOKOLOV, 1986).

Pesquisas sobre a utilização de sistemas ativos têm sido desenvolvidas com intuito de evitar o congelamento do fluido no coletor, como estudado por Beckman et al. (1994), ou para detectar as deficiências de funcionamento do sistema em função do projeto, dos controles e dos “set points” adotados. Freeborne (1985) e Joncich (1991) também procuraram estabelecer

recomendações ou padrões para sistemas residenciais visando à melhoria do desempenho e confiabilidade dos mesmos.

O desempenho dos sistemas de aquecimento de água com energia solar tem sido conhecido por meio do estudo do comportamento de seus componentes sob diversas configurações de instalação. Como resultados destas pesquisas surgiram metodologias para a determinação da eficiência como, por exemplo, a proposta pela ASHRAE (1996) e por Bosanac & Nielsen (1997) para os coletores. Tais métodos geralmente consideram a condição de funcionamento em regime permanente.

Também foram realizados estudos considerando o sistema submetido a regime não permanente, tais como: a avaliação do rendimento de coletores planos para sistemas ativos, citados por Amer et al. (1997), e para sistemas passivos, pesquisados por Huang (1980). A avaliação do comportamento do reservatório de água quente em relação ao trocador de calor, desenvolvida por Dahm et al. (1998).

Uma alternativa para evitar a complexidade dos modelos analíticos é a aplicação do conceito de rede neural artificial (RNA). Kalogirou et al (1999) aplicaram esta ferramenta para um sistema doméstico passivo em que os parâmetros de entrada eram: a área do coletor, o coeficiente de perda de calor (U), tipo e volume do reservatório. Com dados da irradiância solar, temperatura média do ambiente e a temperatura média da água no início do dia, obtidos em dez experimentos, a rede foi “treinada” para predizer a energia útil que poderia ser absorvida e a temperatura no reservatório para quaisquer outras situações.

A implantação, gerenciamento e operação de um sistema de aquecimento solar de modo a garantir eficiência e segurança, especialmente em grandes edificações, impõem o conhecimento minucioso do seu comportamento, monitoramento e controle dos processos. Embora inúmeros estudos tenham sido feitos, a dúvida na adoção dos parâmetros que influenciam o funcionamento e que resultam em uma vazão ideal de circulação de água nos coletores ainda persiste.

Para muitas aplicações é desejável armazenar energia a temperaturas maiores que as possíveis com coletores planos. Um aumento de temperatura é conseguido diminuindo-se a área onde ocorrem as trocas de calor. Isto se dá por interposição óptica entre a fonte de radiação e a superfície absorvedora, a

fim de se conseguir alto nível de radiação em uma pequena área absorvedora. Este procedimento dá origem ao que se chama de concentrador solar ou sistemas concentradores que é, objeto deste estudo.

3.2 Revisão de literatura

3.2.1 Coletores concentradores

Muitos tipos de concentradores podem ser fabricados para aumentar o fluxo de radiação sobre os absorvedores. Eles podem ser refletores ou refratores. Podem ser cilindros-parabólicos de focos lineares, ou círculo-parabólico de foco pontual. Os refletores parabólicos podem ter superfícies cilíndricas (com absorvedor tubular) ou superfície de revolução (com absorvedor esférico ou hemisférico). Os coletores de foco linear (luz concentrada sobre a linha focal do cilindro-parabólico) são os mais estudados e muito usados em aplicações experimentais. Os concentradores com receptores muito pequenos são efetivos apenas para radiação direta. Então, fica evidente que a orientação do concentrador sobre a radiação é importante e que o rastreamento solar é indispensável para este tipo de coletor, para que concentre a luz sobre o absorvedor (DUFFIE & BEKMAN, 1980).

Vários mecanismos de orientação foram desenvolvidos para focalizar estes coletores de modo que o feixe de radiação incidente seja refletido sobre o receptor absorvedor. Os movimentos requeridos para o rastreamento variam com o projeto do sistema óptico e o movimento resultante pode ser de difícil descrição matemática para sistemas com mais de um grau de liberdade.

Sistemas de foco linear focalizam a radiação sobre o absorvedor se o sol estiver no plano central do concentrador, isto é, o sol deve estar no mesmo plano que a linha focal e o vértice do refletor.

Para este tipo de sistema, é possível fazer o rastreamento solar com rotação apenas em relação a um eixo. Este eixo de rotação pode ser norte-sul, leste-oeste, ou inclinado e paralelo ao eixo terrestre (no caso de rotação a uma taxa de 15º/hora). Mas são significativas as diferenças na quantidade de radiação incidente e na qualidade da “imagem” obtida com o uso dos três modos de orientação.

Concentradores circulares necessitam ser orientados para que foco, vértice e sol fiquem na mesma linha. Isso é feito movendo-o segundo dois eixos de rotação. Os sistemas de orientação podem ter ajustes contínuos ou intermitentes, com movimentos do coletor para compensar a mudança horária da posição solar. Para alguns coletores de baixa concentração, como os de focos lineares, é possível fazer ajuste de posição intermitente, semanalmente, por exemplo.

Sistemas com orientação constante podem ser movimentados manualmente ou com operação mecânica, os sistemas manuais dependem de observadores experientes para fazerem as correções necessárias e podem ser adequados para alguns propósitos se a taxa de concentração e o custo de mão de obra não são altos.

Sistemas com orientação mecanizada podem ter seguidores solares (sun-seeking) ou rastreadores programáveis. Sistemas rastreadores usam detectores para determinar o erro de alinhamento e fazer as correções necessárias para realinhar o conjunto. Sistemas programados fazem o coletor se mover de maneira predeterminada, e necessitam apenas de uma vistoria ocasional para assegurar o alinhamento. Pode ser vantajosa, também, a combinação de dois métodos de rastreamento; por exemplo, sobrepor uma pequena correção por um “sun-seeking” sobre um rastreador programado.

3.2.2. Razão de concentração

A definição de razão de concentração, que será usada aqui é a razão de concentração de radiação por área, razão entre a área do coletor e a área do receptor (absorvedor). A razão de concentração de fluxo é definida como a razão entre o fluxo de energia sobre os receptores e o fluxo de energia na área de abertura do coletor, mas tem a utilidade limitada uma vez que o fluxo de energia no receptor pode apresentar grandes variações (GUAY, 1980).

A razão de concentração por área é dada pela equação 3.1.

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (3.1)$$

em que,

C = grandeza adimensional conhecida como razão de concentração;

A_a = área de abertura do coletor, em m^2 ;

A_r = área do receptor de radiação, em m^2 .

Esta razão tem um limite superior que depende do tipo de concentração tridimensional (concentrador circular parabolóide) ou bidimensional (concentrador de foco linear).

Rabl (1976) desenvolveu uma metodologia para estimar a razão de concentração máxima com base no segundo princípio da termodinâmica, aplicada à transferência de calor entre sol e o receptor, considerando-se um concentrador circular com área de abertura A_a , o sol de raio r_{ss} e um receptor de área A_r , e com o concentrador posicionado a uma distância R do sol como ilustra a Figura 3.1 (RABL, 1976).

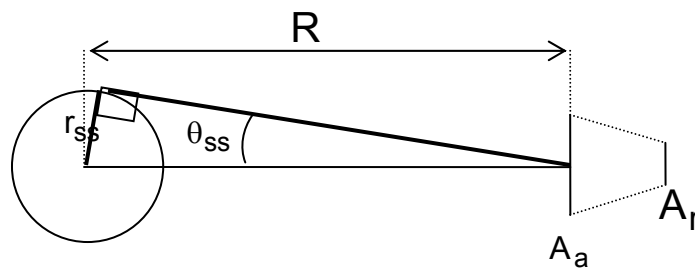


Figura 3.1 Representação esquemática do sol a uma temperatura T_s , a uma distancia R do concentrador de área A_a e receptor de área A_r . Adaptado de Rabl (1976).

Na Figura 3.1, θ_{ss} representa o semi-ângulo subtendido pelo disco solar. O receptor está representado depois da área de abertura apenas por questões práticas, mas os argumentos para se estimar a razão de concentração seriam os mesmos, caso o receptor estivesse entre o sol e a área de abertura. RABL (1976) obteve uma estimativa para a razão de concentração máxima de 45000, para coletores circulares. Posteriormente Kreith & Kreider (1978) estimaram a razão de concentração máxima igual a 212 para os concentradores cilíndricos.

A secção transversal de um coletor concentrador linear é ilustrada na Figura 3.2, evidenciando uma série de fatores importantes. O feixe de radiação solar incidente tem abertura angular de $0,53^\circ$ ($31,8'$) e incide sobre o concentrador na direção paralela ao plano central da parábola (plano descrito

pele eixo focal e o vértice da parábola). Tem-se a radiação incidindo em B, na borda do refletor onde o raio r_{cf} , do espelho, é máximo e o ângulo ζ_c é o ângulo de abertura e está descrito por $\widehat{A\hat{F}B}$.

Para coletores com alinhamento perfeito, o tamanho do receptor para interceptar “toda” a imagem solar dependerá da forma do receptor. Para um receptor cilíndrico de diâmetro D tem-se (Equação 3.2):

$$D = 2r_c \text{ sen}16' \quad (3.2)$$

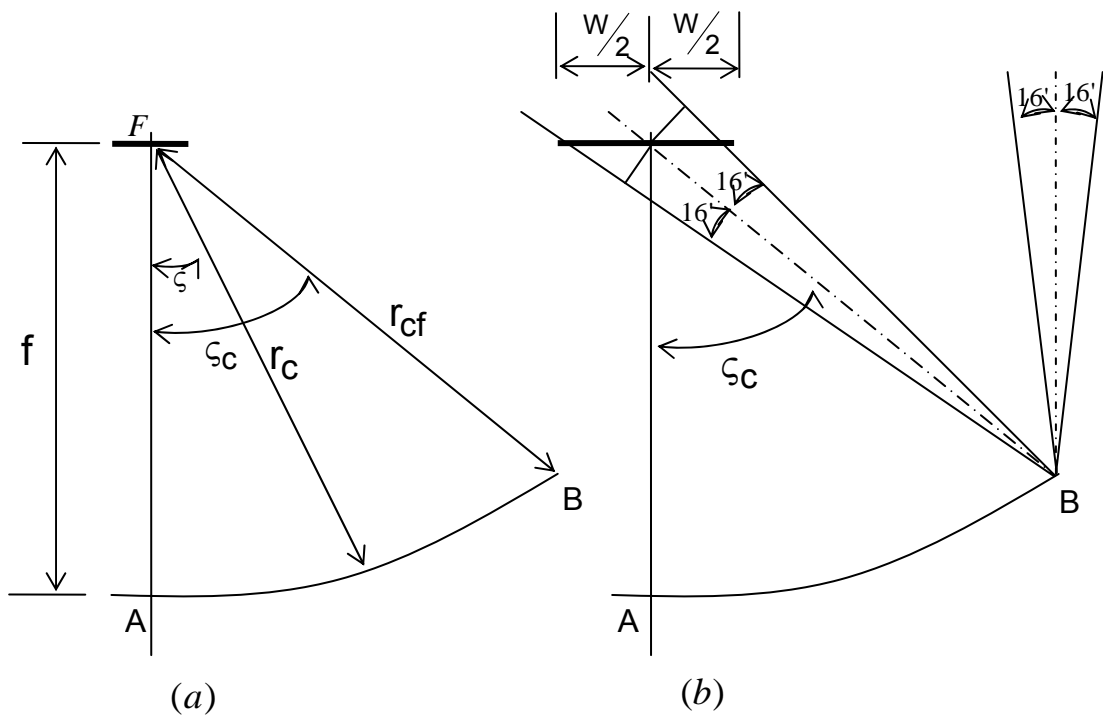


Figura 3.2: (a) Secção de um concentrador de foco linear, (b) Dimensões da imagem.

Para um receptor plano normal ao eixo da parábola a largura do receptor será dada pela Equação 3.3.

$$W = \frac{2r_c \text{ sen}16'}{\cos(\zeta_c + 16')} \quad (3.3)$$

A distância r_c a partir de um ponto do refletor até o foco pode ser escrita para cada tipo de refletor. Para um refletor parabólico, a distância focal f , é

uma constante da equação de superfície $y^2 = 4fx$ e r_c é dado por $\frac{2f}{1 + \cos \phi}$, onde ϕ é o ângulo entre os segmentos foco-vértice e r_c .

Como ϕ varia a partir do zero até ϕ_c , r_c cresce a partir de f até r_{cf} e teoricamente a imagem cresce a partir de $2f \cdot \text{sen}16'$ até $\frac{2r_{cf} \text{sen}16'}{\cos(\phi_c + 16')}$. Esta previsão é válida para sistemas geometricamente perfeitos (DUFFIE & BEKMAN, 1980).

Como a radiação sobre o receptor não é uniformemente distribuída, isto tende a distorcer a imagem. Quando se consideram os refletores utilizados na prática, percebe-se que estes não são instrumentos ópticos precisos e produzem imagens maiores que as previstas teoricamente.

Esse aumento no tamanho da imagem se deve a uma série de fatores. Primeiro, a parábola não é perfeita. Isso causa uma dispersão, δ_r , na imagem resultante como se pode ver na Figura 3.3. O fluxo refletido tem abertura angular ($\delta_r + 0,53$) em graus. O tamanho de um receptor cilíndrico neste caso será (Equação 3.4):

$$D_o = 2r_{cf} \text{sen}\left(\frac{\delta_r}{2} + 16'\right). \quad (3.4)$$

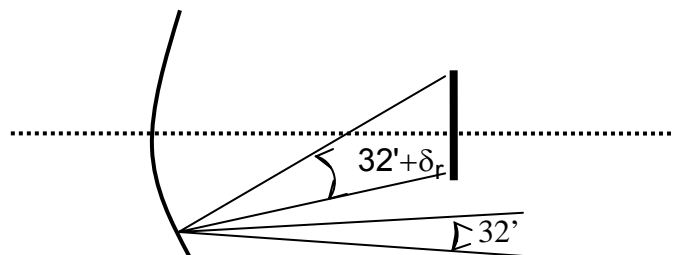


Figura 3.3: Esquema de um concentrador com ângulo de dispersão δ_r .

O segundo fator é devido a orientação do concentrador. Erros de apenas um grau podem alterar em muito a razão de concentração (LOF & DUFFIE 1963). Na prática as imagens não têm um contorno bem definido como se pode ver na Figura 3.4. Então, usa-se um receptor que intercepte toda a radiação refletida specularmente. Como as perdas térmicas aumentam com o aumento

da área do receptor e as perdas ópticas diminuem, busca-se um ponto de melhor desempenho.

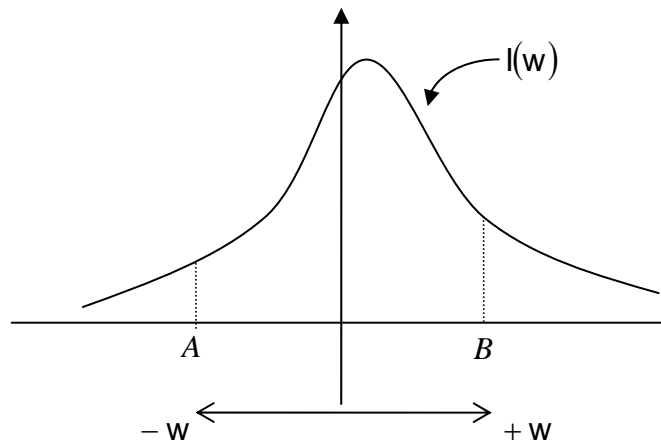


Figura 3.4: Distribuição da radiação de um refletor cilíndrico sobre um receptor de largura AB

Uma otimização deste problema foi feita por Lof & Duffie (1963), expresso em termos do fator de interceptação Γ , que é a fração da radiação refletida de forma especular interceptada pelo receptor (equação 3.5).

$$\Gamma = \frac{\int_A^B I(w) dw}{\int_{-\infty}^{\infty} I(w) dw} \quad (3.5)$$

em que,

$I(w)$ = intensidade de radiação sobre o receptor em função da distância ao centro da área focal w , em W/m^2 .

Segundo Lof & Duffie (1963), a radiação absorvida por unidade de área pode ser descrita pela Equação 3.6.

$$S = I_d \rho_c \Gamma \alpha_c \quad (3.6)$$

em que,

S = radiação absorvida por unidade de área e de tempo, em W/m^2 ;

I_d = irradiância direta sobre o plano de abertura, em W/m^2 ;

ρ_c = refletância especular, adimensional;

Γ = fator de interceptação, adimensional;

α_c =absorbância do receptor, adimensional.

A refletância corresponde à porcentagem de luz que é refletida. O produto das três constantes ρ_c , Γ e α_c , pode ser entendido como fator de eficiência óptica do coletor.

3.2.3. Desempenho térmico de coletores concentradores

O cálculo do desempenho dos coletores concentradores segue os mesmos passos dos coletores planos. A radiação absorvida por unidade de área de abertura (S) pode ser estimada a partir das características ópticas do concentrador e receptor. Onde se deve considerar ainda a absorbância do receptor e a refletância da chapa espelhada.

A energia térmica perdida pelo receptor pode ser estimada pelo coeficiente (U_L), que depende da área do receptor.

A princípio, o gradiente de temperatura no receptor pode ser descrito por um fator de remoção térmica (F_R) que relaciona as temperaturas, de entrada e saída, do fluido que passa pelo receptor no balanço de energia. É necessário desenvolver expressões apropriadas para o fator de eficiência (F'), o coeficiente de perda (U_L) e para o fator de remoção de calor no coletor. Com F_R e U_L conhecidos pode-se calcular o ganho dos coletores.

Como exemplo de cálculo do coeficiente de perda térmica, considera-se um tubo absorvedor cilíndrico que está sendo usado como receptor num concentrador linear e assume-se que não existe um gradiente de temperatura ao longo do tubo receptor (DUFFIE & BEKMAN, 1980).

Considerando perdas por convecção, radiação de superfície e condução direta ao suporte da estrutura, o coeficiente de perda térmica pode ser estimado pela Equação 3.7.

$$U_L = h_w + h_r + U_{\text{cond}} \quad (3.7)$$

em que,

U_L = coeficiente de perda térmica, em $W/m^2 K$;

h_w = coeficiente de perda térmica por convecção, em $W/m^2 K$;

h_r = coeficiente de perda térmica por radiação, em $W/m^2 K$;

U_{cond} = coeficiente de perda térmica por condução, em $W/m^2 K$.

O coeficiente de perda por radiação, h_r , linearizado pode ser calculado por meio da Equação 3.8 (DUFFIE & BEKMAN, 1980).

$$h_r = 4 \sigma \varepsilon \bar{T}^3 \quad (3.8)$$

em que,

\bar{T} = temperatura média do tubo absorvedor (receptor), em K;

ε = emitância da superfície do absorvedor, adimensional;

σ = constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Watmuff et al (1977), chegou a uma relação para estimar as perdas por convecção em termos da velocidade do ar, V_{ar} , considerando a temperatura ambiente de 25° C (Equação 3.9).

$$h_w = 2,8 + 3 V_{ar} \quad (3.9)$$

com velocidade em m/s e h_w em $\text{W/m}^2\text{°C}$.

Estimativas das perdas por condução podem ser feitas conhecendo-se os detalhes da construção ou fazendo-se medidas num coletor particular.

Os fatores que mais afetam o desempenho dos coletores são temperatura de operação, nível de insolação líquida no coletor, geometria do coletor, propriedades físicas do fluido e temperatura ambiente (SOIN et al, 1979).

3.2.4. Desempenho térmico do receptor

Se o concentrador é perfeito, a radiação incidente sobre a abertura (e sobre o receptor) é a fração da radiação emitida pelo sol interceptada pela área de abertura, como mostra a Figura 3.1. Então a taxa com que a energia solar chega ao receptor, $Q_{s \rightarrow r}$, será dada pela Equação 3.10 (RABL, 1976):

$$Q_{s \rightarrow r} = A_a \frac{r_{ss}^2}{R^2} \sigma T_s^4 \quad (3.10)$$

em que,

r_{ss} = raio do sol, em metros;

R = distância Terra-Sol, em metros;

T_s = temperatura da fotosfera, em Kelvin.

Um receptor perfeito (corpo negro) irradia energia a uma taxa igual a $A_r \sigma T_r^4$ e uma fração desta, $E_{r \rightarrow s}$ chega ao sol (Equação 3.11).

$$Q_{r \rightarrow s} = A_r \sigma T_r^4 E_{r \rightarrow s} \quad (3.11)$$

em que,

$Q_{r \rightarrow s}$ = energia irradiada pelo absorvedor, em Joules;

T_r = temperatura do absorvedor, em Kelvin;

$E_{r \rightarrow s}$ = fração da energia irradiada pelo absorvedor que chega ao Sol, adimensional.

Quando T_r e T_s são iguais, o segundo princípio da Termodinâmica requer que $Q_{s \rightarrow r}$ seja igual a $Q_{r \rightarrow s}$. Então, a partir das Equações 3.10 e 3.11, obtém-se a Equação 3.12.

$$\frac{A_a}{A_r} = \frac{R^2}{r^2} E_{r \rightarrow s} \quad (3.12)$$

O máximo valor de $E_{r \rightarrow s}$ é uma unidade. A razão de concentração máxima para um concentrador circular será (Equação 3.13):

$$\left(\frac{A_a}{A_r} \right)_{\max,c} = \frac{R^2}{r^2} \longrightarrow \left(\frac{A_a}{A_r} \right)_{\max,c} = \frac{1}{\sin^2 \theta_s} \quad (3.13)$$

Um desenvolvimento semelhante feito por Kreith & Kreider (1978) levou a um fator de concentração para coletores de foco linear dado pela Equação 3.14.

$$\left(\frac{A_a}{A_r} \right)_{\max,l} = \frac{1}{\sin \theta_s} \quad (3.14)$$

Como o ângulo $\theta_s = 0,27^\circ$, o máximo valor possível para a razão de concentração para um concentrador linear é 212. A temperatura que a energia está sendo entregue será maior quanto maior for o fator de concentração e precisão óptica tanto do concentrador quanto da orientação do sistema.

Uma vez que o fluxo de calor num sistema concentrador pode ser alto, a resistência à transferência de calor a partir da superfície externa do tubo receptor para o fluido depende da espessura do tubo. O coeficiente de

transferência de calor (em função do diâmetro externo do tubo) do ambiente para o fluido é dado pela Equação 3.15 (DUFFIE & BEKMAN, 1980).

$$U_o = \left[\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi}D_i} + \frac{D_o \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2k} \right]^{-1} \quad (3.15)$$

em que,

U_o = coeficiente de transferência de calor, dado em $W/m^2.K$;

D_i = diâmetros internos do absorvedor, em m;

D_o = diâmetro externo do absorvedor, em m;

h_{fi} = coeficiente de transferência de calor para o interior do tubo, em $W/m^2.K$;

k = condutividade térmica do tubo, em $W/m.K$.

O ganho de energia útil por unidade de comprimento do coletor, q'_u , expresso em termos da temperatura do receptor, T_r e da radiação solar absorvida por unidade de área é dado pela Equação 3.16.

$$q'_u = \frac{A_a S}{L} - \frac{A_r U_L}{L} (T_r - T_a) \quad (3.16)$$

em que,

q'_u = ganho de energia útil por unidade de comprimento do coletor, em W/m ;

A_a = área não sombreada do concentrador, em m^2 ;

T_a = temperatura ambiente, em Kelvin;

A_r = área do receptor (igual $\pi L D_o$ para absorvedor cilíndrico), dada em m^2 ;

U_L = coeficiente de perda térmica, em $W/m^2.K$;

L = comprimento do receptor, em m.

Em termos da energia transferida ao fluido a uma temperatura T_f , q'_u é (Equação 3.17) (DUFFIE & BEKMAN, 1980):

$$q'_u = \frac{\frac{A_r}{L} (T_r - T_f)}{\frac{D_o}{h_{fi}D_i} + \frac{D_o}{2k} \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)} \quad (3.17)$$

q'_u = ganho de energia útil por unidade de comprimento do coletor, em W/m ;

L = comprimento do receptor, em m.

T_r = é a temperatura local do receptor, em K;

T_f = temperatura do fluido no interior do absorvedor, em K.

Eliminando T_r das equações 3.16 e 3.17, tem-se a equação 3.18:

$$q'_u = F' \frac{A_a}{L} \left\{ S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T_f - T_a) \right\} \quad (3.18)$$

onde,

F' = fator de eficiência do coletor, adimensional;

U_L = coeficiente de perda térmica, em $W / m^2.K$;

T_a = temperatura ambiente, dada em kelvin.

U_L = coeficiente de perda térmica, em $W / m^2.K$;

O fator de eficiência pode ser calculado pela Equação 3.19.

$$F' = \frac{U_o}{U_L} \quad (3.19)$$

O ganho máximo de energia pelo coletor é estimado por meio da Equação 3.20.

$$Q_u = A_a F_R \left\{ S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T_f - T_a) \right\} \quad (3.20)$$

em que,

Q_u = energia útil absorvida por unidade de tempo, dada em W;

U_L = coeficiente de perda térmica, em $W / m^2.K$;

F_R = fator de remoção térmica, adimensional;

O fator de fluxo térmico através do absorvedor é dado pela razão entre o fator de remoção térmica e o fator de eficiência (Equação 3.21):

$$F'' = \frac{F_R}{F'} \quad (3.21)$$

em que,

F'' = fator de fluxo térmico, adimensional.

F_R = fator de remoção térmica, adimensional;

F' = fator de eficiência do coletor, adimensional;

Para determinar F_R considera-se a situação apresentada na figura 3.5. O fluido atravessa uma região de comprimento Δy , onde é absorvida uma

quantidade de energia por unidade de comprimento q'_u . Ao atravessar essa região a temperatura do fluido varia de $T_{f,i}$ para $T_{f,o}$, como ilustra a figura 3.5. Pode-se então fazer o balanço de energia sobre o fluido aplicando-se o primeiro princípio da termodinâmica, chegando-se à Equação 3.22.

$$\dot{m}C_P T_{f,i}|_y - \dot{m}C_P T_{f,o}|_{y+\Delta y} + \Delta y q'_u = 0 \quad (3.22)$$

em que,

\dot{m} = fluxo de fluido no absorvedor, dado em kg/s;

C_P = calor específico do fluido, dado em J/kg.K;

$T_{f,i}$ = temperatura do fluido na posição y do tubo absorvedor, dada em K;

$T_{f,o}$ = temperatura do fluido na posição $y + \Delta y$ do tubo absorvedor, dada em K;

Δy = comprimento da região delimitada pela superfície de contorno.

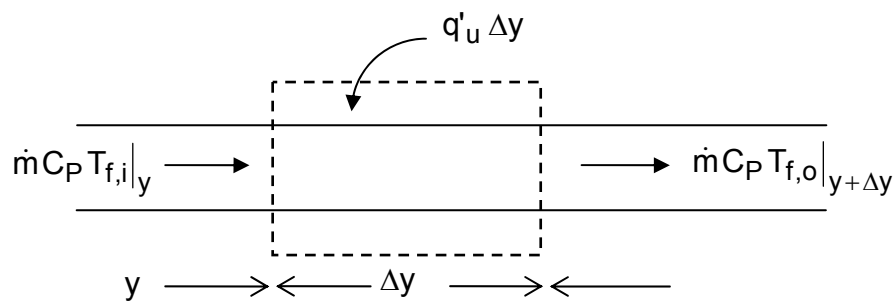


Figura 3.5: Balanço de energia sobre o fluido sem mudança de fase.

Para Δy tendendo a zero, a Equação 3.22 pode ser reescrita na forma da Equação 3.23.

$$\dot{m}C_P \frac{dT_f}{dy} - q'_u = 0 \quad (3.23)$$

em que,

$\frac{dT_f}{dy}$ = taxa de variação da temperatura ao longo do comprimento do tubo

absorvedor.

Resolvendo-se a Equação 3.23 chega-se a Equação 3.24 (DUNKLE & COOPER, 1975).

$$\frac{T_{f,o} - T_a - \frac{S}{U_L}}{T_{f,i} - T_a - \frac{S}{U_L}} = e^{-\frac{U_L A_r F'}{\dot{m} C_p}} \quad (3.24)$$

É importante definir uma grandeza que relaciona o ganho de energia no coletor com o ganho de energia do fluido. Esta grandeza é chamada de fator de remoção térmica F_R e é estimada por meio da Equação 3.25.

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p (T_{f,o} - T_{f,i})}{q'_u} \quad (3.25)$$

Após algumas manipulações algébricas, F_R pode ser expressa conforme a Equação 3.26.

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A_r U_L} \left[1 - e^{-\frac{U_L A_r F'}{\dot{m} C_p}} \right] \quad (3.26)$$

O fator de fluxo térmico, F'' (Equação 3.27), através do absorvedor é definido como a razão entre F_R e F' , sendo que F'' é função de uma única variável adimensional equivalente a uma capacitância do coletor, $\frac{\dot{m} C_p}{A_r U_L F'}$.

$$F'' = \frac{\dot{m} C_p}{A_r U_L F'} \left[1 - e^{-\frac{U_L A_r F'}{\dot{m} C_p}} \right] \quad (3.27)$$

Em receptores como os aqui considerados, o termo F' é calculado por meio da Equação (3.19) e sempre é igual a F_R , se não houver gradiente de temperatura na direção do fluxo.

Assim, o rendimento do coletor será dado pela Equação 3.28 ou pela Equação 3.29.

$$\eta_t = \frac{A_a F_R}{A_a I_G} \left\{ S - \frac{A_r U_L}{A_a} (T_{f,o} - T_a) \right\} \quad (3.28)$$

$$\eta_c = \frac{\dot{m} C_p (T_{f,o} - T_a)}{A_a I_G} \quad (3.29)$$

onde,

$T_{f,o}$ = temperatura do fluido na saída do tubo absorvedor.

As Equações 3.19 à 3.26 são válidas desde que não aconteça mudanças de fase no fluido.

Quando acontece uma mudança de fase, no fluido de trabalho, a solução da Equação 3.19 se torna complexa. E então, para se obter os parâmetros F' , F'' , FR e η , deve se levar em consideração a mudança de fase.

A energia útil adquirida pelo fluido, Q_{UTIL} , será dada pela Equação 3.20, 3.30 ou pela equação 3.31.

$$Q_U = \dot{m} C_P (T_{f,o} - T_a) + \dot{M} L_V \quad 3.30$$

Onde L_V é o calor latente de vaporização em J/g e \dot{M} é vazão mássica de vapor em $\frac{g}{s}$.

$$Q_U = A_a \Gamma \rho_c \tau_r \alpha_c I_G - Q_L \quad 3.31$$

Onde Q_L é a energia perdida pelo coletor, Γ é a fração de interceptação da radiação solar incidente no receptor, ρ_c é a refletância da superfície refletora, τ_r é a transmitância do revestimento do receptor (não usando revestimento $\tau_r = 1$) e α_c é a absorbância do receptor.

Por meio das Equações 3.20 e 3.31 pode-se encontrar o fator de remoção térmica.

$$F_R = \frac{A_a \Gamma \rho_c \tau_r \alpha_c I_G - Q_L}{A_a \left\{ S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T_f - T_a) \right\}} \quad 3.32$$

Utilizando-se as equações 33 e 35 é possível determinar o fator de fluxo no absorvedor de radiação do coletor concentrador e, por fim, o rendimento do coletor utilizando-se a equação 3.33.

$$\eta = F_R - \frac{F_R U_L}{I_G} (T_f - T_a) \quad 3.33$$

3.3 Objetivos

Objetivou-se com este trabalho, descrever a metodologia usada na construção de um coletor solar concentrador de foco linear, com materiais disponíveis no mercado de Viçosa e fazer sua avaliação experimental para se

avaliar sua viabilidade como fonte alternativa de energia para aquecimento e destilação de água.

As metas específicas apresentadas neste capítulo foram:

- I. Construir um concentrador solar cilindro-parabólico;
- II. Determinar a eficiência de conversão energética e temperatura de operação;
- III. Realizar análise econômica para se determinar a viabilidade.

3.4 Material e métodos

3.4.1 Montagem do coletor

O aço inox apresenta uma refletância em torno de 80%, tem boa durabilidade e está disponível no mercado local.

Para construir o coletor concentrador de foco linear foi feita uma estrutura de metalon, 30mm x 20mm e 20mm x 20mm, e barras chatas de 25,40mm x 4,76mm (1polegada x 3/16polegadas). A estrutura de metalon sustenta as barras chatas que foram curvadas em formato parabólico para garantir um foco linear, como mostrado na figura 3.6.



Figura 3.6: Estrutura construída em metalon e barras chatas, que será usada na montagem do coletor.

Antes de serem soldadas as barras de ferro foram curvadas num molde feito em MDF (“Medium-Density Fiberboard” – Placa de fibra de madeira de média densidade), com uma curva parabólica dada pela equação 3.34.

$$y = \frac{x^2}{4f} \quad 3.34$$

onde f é distância focal e tem um valor fixo que neste caso, optou-se por usar distância focal, $f = 20$ cm e y representa a profundidade da calha.

Para fabricar o molde, plotou-se a função $y = 1.25x^2$ sobre papel milimetrado em tamanho real, que foi colado sobre o MDF. Fez-se a marcação no MDF que em seguida foi cortado utilizando-se serra tico-tico.

Depois de curvadas as barras foram soldadas na estrutura de metalon. Posteriormente aplicou-se zarcão na estrutura para protegê-la de oxidação e após secagem colocou-se a chapa de aço inox que, por ser muito maleável, adaptou-se perfeitamente à estrutura e foi fixada por parafusos.

A chapa de aço utilizada tem dimensões de 1,10m x 2m. E então, para se determinar a largura da calha refletora fez-se o cálculo a partir do comprimento do arco de parábola. Como a chapa de aço tem 1,10 m de largura, o arco de parábola terá apenas 0,55 m. Deve-se conhecer o valor do seguimento horizontal, x , para construir a estrutura em metalon. E então, fez-se o cálculo para o seguimento em função do comprimento do arco. Como ilustrado na figura 3.7.

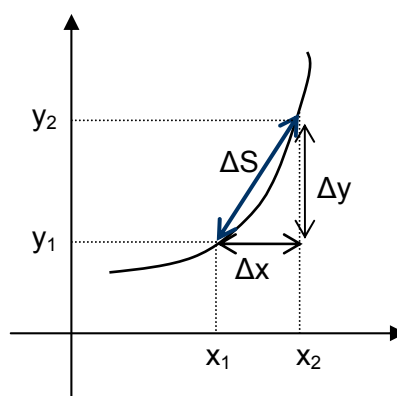


Figura 3.7: Curva de uma função qualquer no plano cartesiano.

O objetivo é encontrar o valor de x em função do comprimento do arco de parábola, para isso precisa-se encontrar o valor de ΔS em função de x . Do esboço mostrado na figura 3.7, usando-se o teorema de Pitágoras tem-se:

$$\Delta S^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2$$

$$\frac{\Delta S^2}{\Delta x^2} = 1 + \frac{\Delta y^2}{\Delta x^2} \Rightarrow \left(\frac{\Delta S}{\Delta x}\right)^2 = 1 + \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)^2$$

No limite de $\Delta x \rightarrow 0$ tem-se:

$$\left(\frac{dS}{dx}\right)^2 = 1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2$$

$$\frac{dS}{dx} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}$$

$$\int dS = \int \left[\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \right] dx$$

Como o arco começa no centro da chapa e vai até a extremidade, o integrando dS deve ser integrado de 0 à 0.55.

$$\int_0^{0,55} dS = \int \left[\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \right] dx$$

$$0,55 = \frac{1}{2} x \sqrt{1 + 6,25x^2} + 0,2 \operatorname{arcsenh}(2,5 x) \quad (3.35)$$

Assim, utilizando-se a equação 3.35 pode se determinar o valor x e como a equação não é simples de ser resolvida utilizou-se o software *mathematica* para resolvê-la. O valor encontrado foi 0,47 metros, obtendo-se a curva mostrada na Figura 3.8.

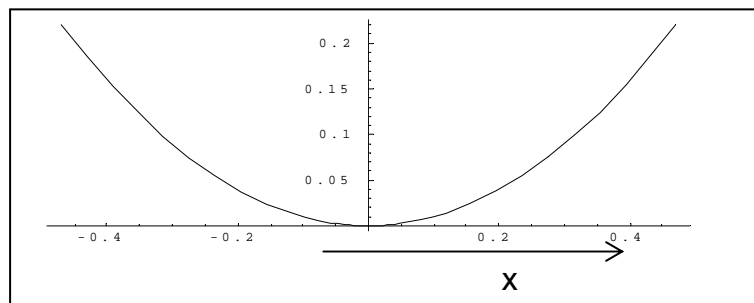


Figura 3.8: Esboço de parábola com foco de 20 cm.

A área de abertura do concentrador é de $1,88 \text{ m}^2$ (2 m de comprimento por 0,94 m de largura) que consiste na área descrita pelo produto do segmento a ($a=2x$) e a borda da calha refletora, como ilustra a Figura 3.9.

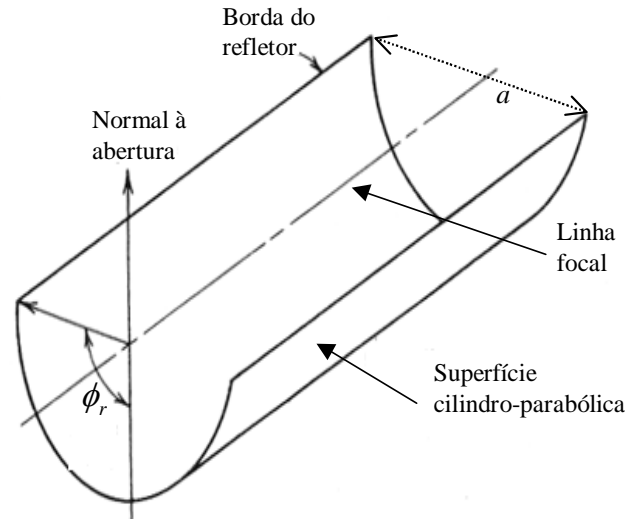


Figura 3.9: Esboço de um concentrador cilindro-parabólico.

No foco, foi colocado um tubo de cobre pintado com tinta preta fosca, Figura 3.10, para diminuir a reflexão da luz incidente sobre ele e aumentar a absorbância. E evidentemente este efeito também aumenta a emitância do tubo.



Figura 3.10: Tubo de cobre enegrecido.

A radiação não é uniformemente distribuída sobre o receptor. Quando se considera um refletor utilizado na prática, percebe-se que este não é um

instrumento ótico preciso e produz imagens grandes se comparadas com as teóricas; diminuindo a razão de concentração do coletor (razão entre a área total do coletor e a área do receptor).

Para a superfície refletora construída observou-se que a região focal tinha de 3 a 3,5 centímetros de largura o que resulta numa região focal de 0,06 a 0,07 metros quadrados. E então, optou-se por utilizar como absorvedor um tubo de cobre enegrecido de 22 milímetros de diâmetro externo e 19 milímetros de diâmetro interno com uma área focal útil de 0,068 m², que resulta numa razão de concentração 27 (área de abertura por área focal).

Um painel fotovoltaico foi fixado à calha refletora para se estudar os efeitos do rastreamento em sistemas fotovoltaicos, exposto no capítulo anterior. Depois de terminada a etapa de montagem, a calha foi montada sobre o sistema de rastreamento que será comentado posteriormente, Figura 3.11.



Figura 3.11: Sistema, calha cilindro-parabólica com painel fotovoltaico acoplados ao rastreador.

Durante o período experimental foram feitas medidas da radiação solar global em três superfícies: (i) superfície horizontal; (ii) superfície inclinada fixa com ângulo de inclinação igual à latitude local (Viçosa, $-20^{\circ} 48' 00''$; longitude,

42° 56'15"W); (iii) superfície móvel com inclinação ajustável por meio eletrônico. Mediu-se ainda temperatura ambiente, temperatura do fluido antes de passar pelo sistema, temperatura do fluido após passar pelo sistema, temperatura ambiente e velocidade do ar.

Para estimar as perdas de calor no sistema, Q_L (por convecção, radiação de superfície e condução direta ao suporte da estrutura), pode-se fazer a integral do coeficiente de perda em relação à temperatura, Equação 3.36.

$$Q_L = \int U_L dT|_{\bar{T}}$$

$$Q_L = h_w(\bar{T} - \bar{T}_a) + \sigma \varepsilon (\bar{T}^4 - \bar{T}_a^4) \quad (3.36)$$

Onde \bar{T} e \bar{T}_a é respectivamente, a temperatura média que o fluido deixa o sistema e temperatura média ambiente. O coeficiente de perda térmica por condução foi desprezado porque é muito pequeno.

A eficiência térmica instantânea do coletor (η_c , eficiência térmica calculada) é definida como a razão entre a energia útil coletada pelo fluido de trabalho e a radiação solar incidente na abertura do coletor.

$$\eta_c = \frac{C_p \dot{m}(T - T_f)}{A_a I_G} \quad (3.37)$$

3.5 Resultados e discussão

A calha refletora apresentou fator de concentração conforme o esperado e foi levada para área experimental para prova de conceito.

De 23 de maio a 07 de junho de 2008, foram realizadas medidas da temperatura ambiente, temperatura do fluido na entrada e saída do sistema radiação solar global e velocidade do ar. Registrou-se os seguintes valores para temperatura média da água na entrada e na saída do sistema, temperatura média ambiente, radiação solar e velocidade do vento.

Quadro 3-1: Valor médio da velocidade do vento, da radiação solar, das temperaturas ambiente e do fluido na entrada e na saída do sistema.

Dia	\bar{T} (°C)	\bar{T}_a (°C)	G_{on} (W/m ²)	T_f (°C)	V(m/s)
23/05/08	81	25	801	23.1	0.8
24/05/08	66.5	24	833	22.7	0.8
25/05/08	68.4	26	832	22.6	1.0
04/06/08	41	32.3	723	22.5	2,0
07/06/08	59.5	26.5	827	23.5	1.2

Observou-se, que o coletor concentrador só tem resposta à radiação direta, por isso alguns autores não consideram a componente difusa da radiação para o cálculo da eficiência em coletores concentradores. Neste trabalho, foi feito o cálculo de eficiência considerando-se a radiação global (eficiência global) e, somente para efeito de comparação, foi feita uma estimativa da eficiência para luz direta. Para isso fez se uma estimativa da radiação direta utilizando-se um modelo matemático desenvolvido para o município de Viçosa-MG (LIMA, 1996).

$$S = e \rho I_G (1 - M) \quad (3.38)$$

Onde M é a fração da radiação global que se encontra na forma de radiação difusa.

$$M = 0,798 + 2,442 \left(\frac{I_G}{I_{bo}} \right) - 9,364 \left(\frac{I_G}{I_{bo}} \right)^2 + 6,9381 \left(\frac{I_G}{I_{bo}} \right)^3 \quad (3.39)$$

em que,

I_G = irradiância solar global, W/m²

I_{bo} = irradiância no topo da atmosfera, W/m²

Durante o experimento, os dados foram coletados em tempo real gerando planilhas de dados com aproximadamente 22000 linhas. Portanto, optou se por apresentar os dados por meio de gráficos.

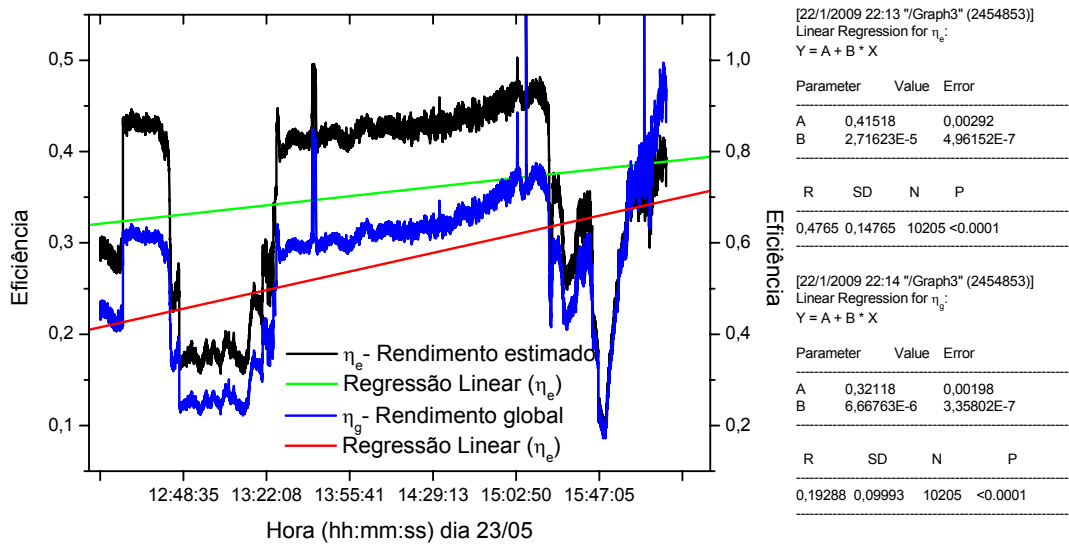


Figura 3.12: Rendimentos η_g e η_e e suas respectivas regressões lineares.

A Figura 3.12 mostra as curvas do rendimento global, η_g e rendimento estimado, considerando-se apenas a componente direta da radiação, η_e e as respectivas regressões lineares para o dia 23 de maio de 2008. Com os dados apresentados no Quadro 3.1, utilizando-se a Equação 3.37, calculou-se a eficiência global média do coletor neste dia, encontrando-se o valor de 37%, que contraria o gráfico pois o valor médio encontrado pela regressão linear do gráfico foi de 35%.

Quando se considera apenas a componente direta da radiação solar, a eficiência média calculada é de aproximadamente 60%. Este cálculo não será feito para outros dias uma vez que se interessa pela eficiência global.

Quadro 3-2: Energia útil absorvida e rendimento global.

Dia	Q_u (MJ)	η_g Calculado	η_g gráfico
23/5/2008	8,3	0,37	0,35
24/5/2008	11,7	0,37	0,37
25/5/2008	11,5	0,31	0,29
4/7/2008	3,1	0,13	0,12
7/6/2008	6,5	0,25	0,24

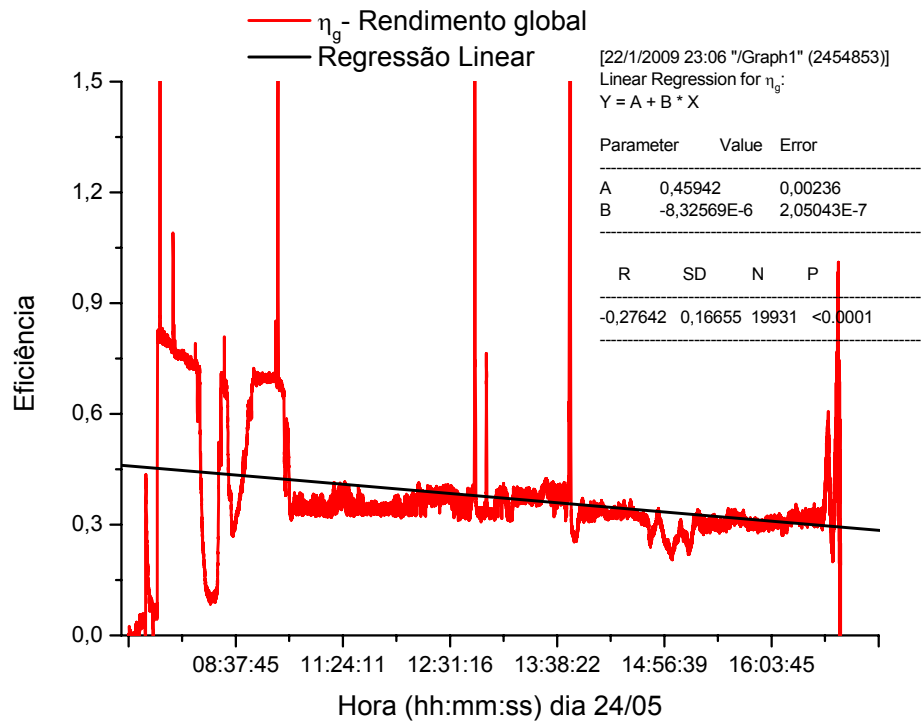


Figura 3.13: Rendimento global no dia 24 de maio e regressão linear.

No dia 24 de maio de 2008, obteve-se uma eficiência média também de 37% (Quadro 3.2) mas registrou-se um decréscimo significativo na temperatura média da água na saída do sistema. Para este dia, a eficiência média calculada foi igual à eficiência média estimada por meio da regressão linear, Figura 1, 13.

Para o dia 25 de maio de 2008, houve um pequeno acréscimo na temperatura média da água na saída do sistema. Encontrou-se uma eficiência média de 31% (Quadro 3.2). Neste dia a eficiência média extraída do gráfico foi de 29%, próxima do valor médio calculado, Figura 3.14.

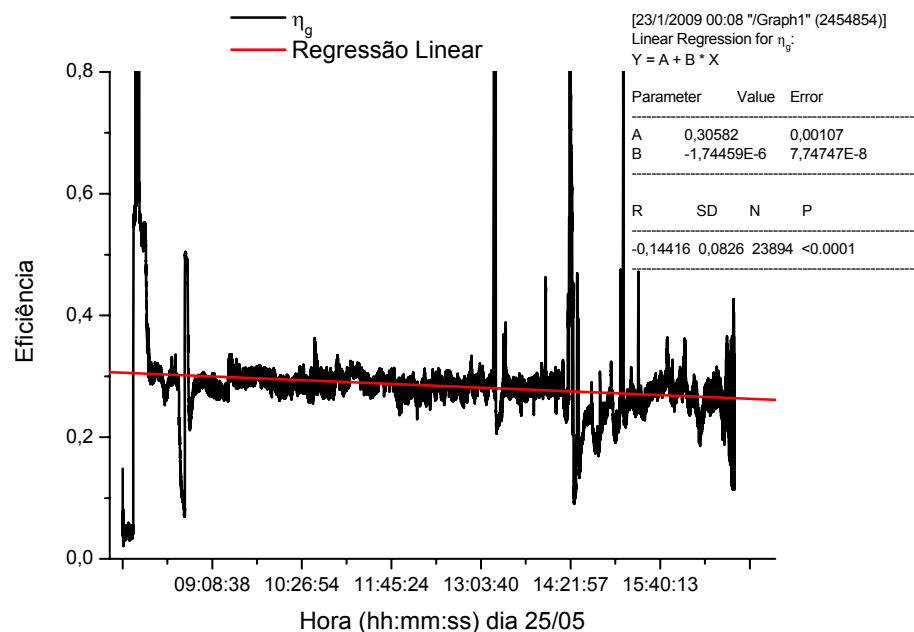


Figura 3.14: Rendimento global no dia 25 de maio e regressão linear.

O dia 04 de junho foi um dia de pouca radiação direta devida a alta incidência de nuvens, temperatura ambiente ligeiramente inferior aos demais dias e velocidade do vento muito maior que nos outros dias. Isso causou uma grande queda na eficiência do coletor. A eficiência média calculada foi de apenas 13% e a prevista pela regressão linear foi de 12%. Este foi o pior rendimento médio registrado para o sistema, Figura 3.15.

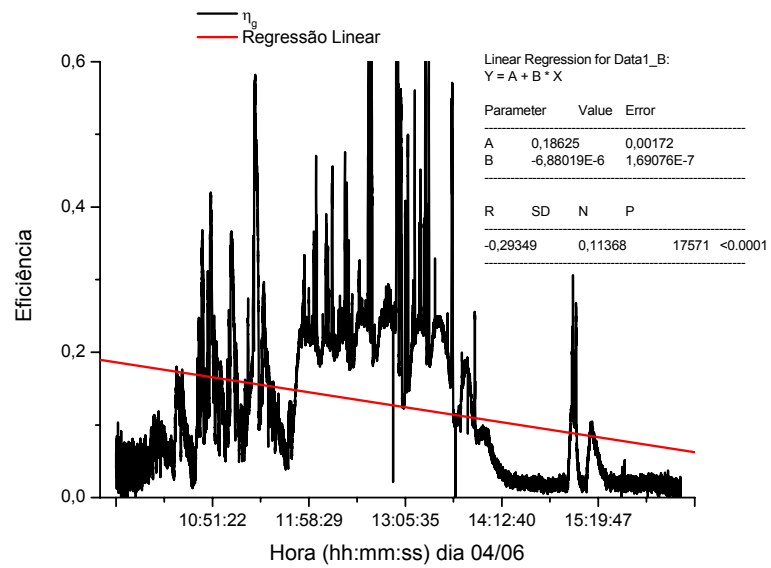


Figura 3.15: Rendimento global no dia 04 de junho e regressão linear.

Por último, para o dia 07 de junho de 2008, encontrou-se uma eficiência média calculada de 25% enquanto que a prevista pela regressão linear foi de 24%, Figura 3.16.

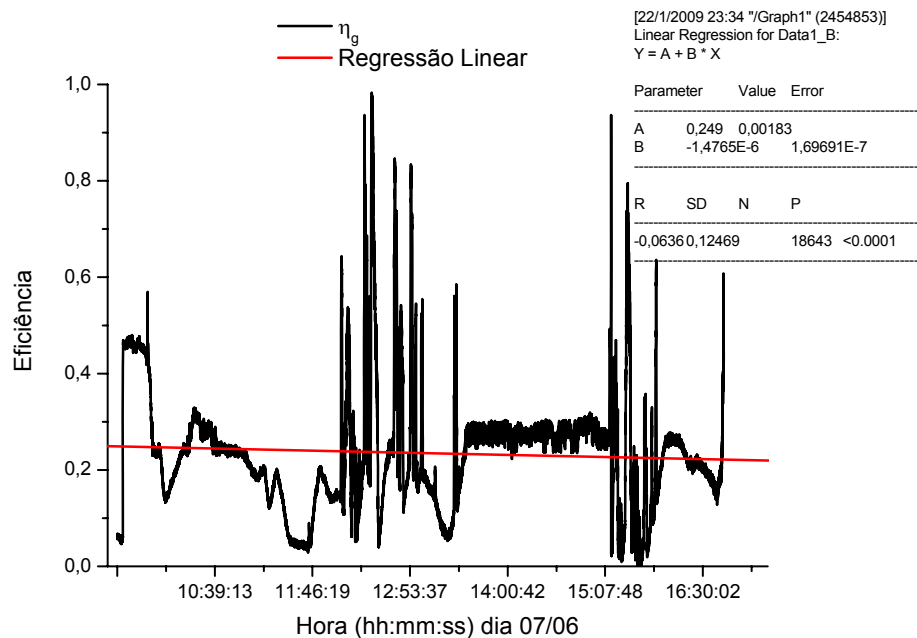


Figura 3.16: Rendimento global no dia 07 de junho e regressão linear

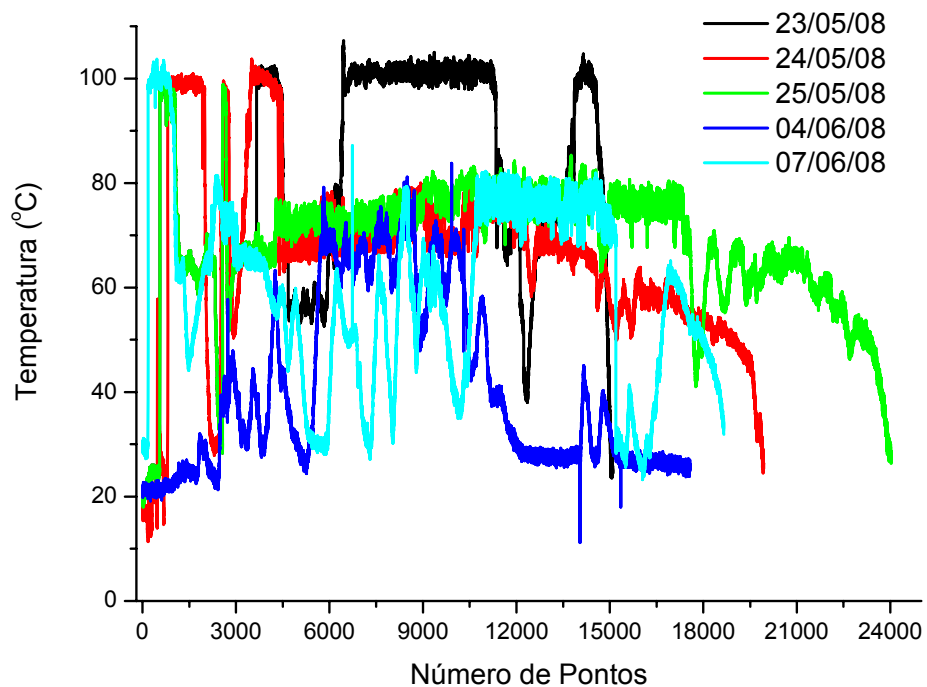


Figura 3.17: Temperatura instantânea da água na saída do sistema, 23 a 25 de maio, 04 e 07 de junho de 2008.

Estimativas das perdas por condução podem ser feitas conhecendo-se os detalhes da construção ou fazendo medidas num coletor particular.

Os fatores que mais afetam o desempenho dos coletores são temperatura de operação, nível de insolação líquida no coletor, geometria do coletor, propriedades físicas do fluido e temperatura ambiente (SOIN et al, 1979). Como se pode confirmar no dia 04 de junho de 2008, outro fator que afeta fortemente a eficiência do coletor concentrador, sem cobertura neste caso, é a velocidade do vento. Somente para efeito de comparação, fez se o gráfico da radiação global para os dias 24 de maio e 04 de junho. Fica claro que a incidência de nuvens também afeta bastante o rendimento de coletores concentradores, Figura 3.18.

A seguir, é mostrado um gráfico de eficiência em função da temperatura do fluido de trabalho. Neste gráfico, pode se observar que a eficiência decresce linearmente com o aumento de temperatura do fluido, ou seja, quanto maior for a temperatura de saída do fluido menor será a eficiência, Figura 3.19.

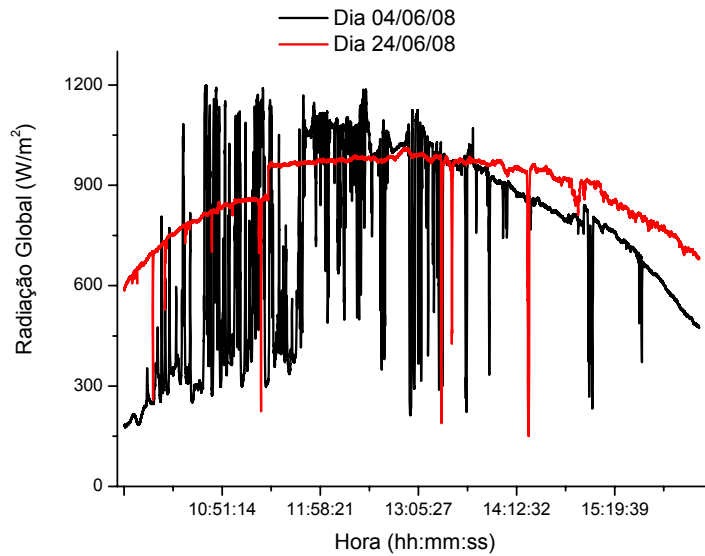


Figura 3.18: Radiação global nos dias 24 de maio e 04 de junho.

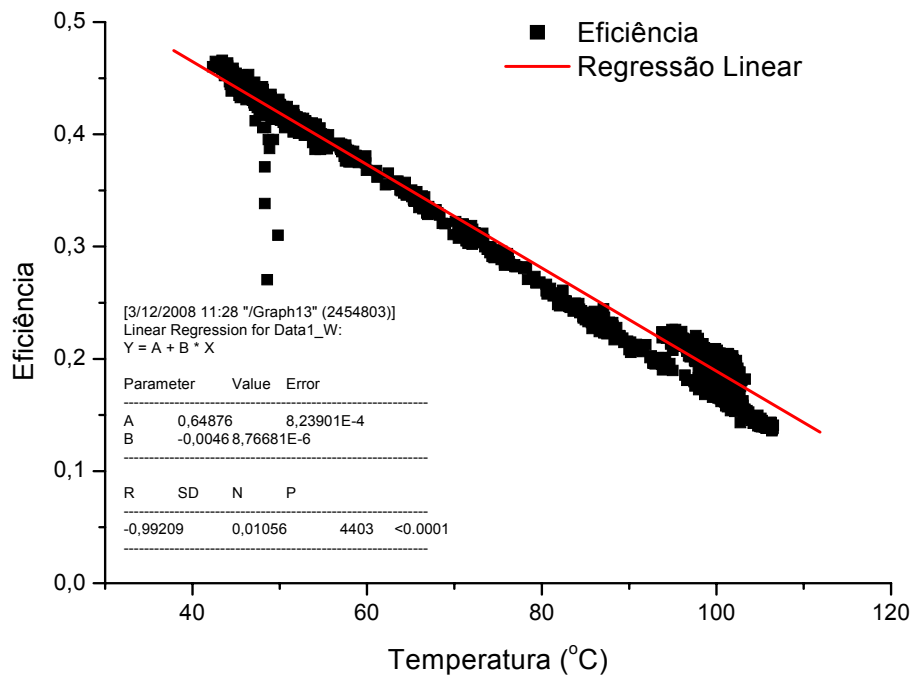


Figura 3.19: Eficiência em função da temperatura de saída da água.

A distribuição de eficiências em função da temperatura onde pode se observar que a eficiência média para temperatura de 100°C ficou em torno de 20%, aumentando linearmente, até 47%, para temperatura de menores. Foi

feita uma regressão linear e o coeficiente de correlação encontrado foi de 0,984.

Percebe-se no gráfico mostrado na Figura 3.19 um acúmulo de pontos próximo à temperatura de saída de 100°C e um significativo aumento na eficiência. Mas estes pontos podem ser desconsiderados porque o que ocorre nesta temperatura é a mudança de fase da água no interior do tubo aumentando a pressão interna e conseqüentemente a vazão, causando ainda um refluxo de água. Após este processo, o tubo então vazio se enche novamente, a temperatura da água na saída é ligeiramente reduzida e daí inicia-se novamente o processo.

Os picos que aparecem nos gráficos de eficiência não representam um valor com significado real. Estes picos são causados pelo efeito da capacitância térmica do coletor.

Quando a radiação solar sobre a abertura do coletor diminui, a temperatura do fluido de trabalho na saída do coletor ainda está alta. Assim, a razão energia útil/energia disponível aumenta significativamente, indicando um grande rendimento. Esta razão cai rapidamente devido ao fluxo de fluido e às perdas térmicas para o ambiente. Quando a radiação global aumenta, era de se esperar o efeito contrário. Este não ocorre com a mesma intensidade porque aquela parcela de fluido que se encontra próxima a saída do sistema já começa a receber mais energia, o que diminui a magnitude dos vales (picos invertidos).

3. 6 Análise econômica

Na análise de custo-benefício (ACB) fez-se a comparação entre os custos de investimento e operação (c_t) incorridos a cada momento do tempo (t) para montagem e operação do equipamento, e os respectivos benefícios (b_t) gerados ao longo do tempo. Tal comparação permitiu analisar a viabilidade do sistema. Fez-se o cálculo de três indicadores para ACB (MOTA, 1998).

Valor presente líquido (VPL);

Relação benefício-custo (B/C);

Taxa interna de retorno (TIR).

3.6.1 Valor presente líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido (VPL), também conhecido como valor *Atual Líquido* ou *Método do Valor Atual*, é a fórmula matemático-financeira de se determinar o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo do investimento inicial (MOTA, 1998). Basicamente, é o cálculo de quanto os futuros pagamentos somado a um custo inicial estaria valendo atualmente (ou saldo de um projeto lucrativo). Equação 3.40.

$$VPL = \sum \left(b_t - \frac{c_t}{(1+d)^t} \right) \quad (3.40)$$

Onde t é o tempo de duração do projeto, que foi considerada como sendo de 10 anos e a taxa de desconto (d) considerada foi de 12% ao ano.

Têm-se as seguintes possibilidades para o Valor Presente Líquido de um projeto de investimento:

- Maior do que zero: significa que o investimento é economicamente atrativo, pois o valor presente das entradas de caixa é maior do que o valor presente das saídas de caixa.
- Igual a zero: o investimento é indiferente, pois o valor presente das entradas de caixa é igual ao valor presente das saídas de caixa.
- Menor do que zero: indica que o investimento não é economicamente atrativo porque o valor presente das entradas de caixa é menor do que o valor presente das saídas de caixa.

Calcula-se a diferença do valor descontado dos benefícios sobre o valor descontado dos custos. $VPL = 0$ indica viabilidade e as ações podem ser denadas de acordo com as magnitudes do VPL. Entretanto, o ordenamento resultante deste indicador depende basicamente da taxa de desconto (d) e da magnitude das necessidades de investimento que determinam o nível de VPL (SAMANEZ, 2002).

Para este projeto tem se o seguinte cálculo de custos, Quadro 3-3.

Quadro 3-3: Investimento de execução e manutenção do sistema.

	Itens	Quant	Preço Unit	Sub total
1	Chapa inox	1	150,00	150,00
2	Metalon 30x20	2	21,00	42,00
3	Metalon 20x20	1	17,00	17,00
4	Barra chata 1'3/16	1	23,00	23,00
5	Tubo suporte	2,5	15,00	37,50
6	Tubo de cobre	1	80,00	80,00
7	Solda	1	7,50	7,50
8	Pedreiro e ajudante	1	75,00	75,00
9	Serralheiro e ajudante	1	75,00	75,00
10	Motores	2	180,00	360,00
11	Circuito eletrônico	1	320,00	320,00
12	Custo de operação anual	1	100,00	100,00
Total				1.287,00

Então, os custos foram de R\$1187,00 para instalação e ainda será necessário um investimento anual de R\$100,00 para manutenção, limpeza semestral e consumo de energia anual. As variáveis c_t e b_t serão dadas pelas equações 3.41 e 3.42.

$$c_t = 1187 + 100t \quad (3.41)$$

$$b_t = 366t \quad (3.42)$$

Onde t está em anos.

O termo 366 que aparece na equação 3.42 indica o ganho financeiro médio por ano de uso do equipamento. Então, por meio da equação 3.40 encontrou-se o VPL = R\$9645,75, considerando-se uma taxa de juros de 12% ao ano.

3.6.2 Relação benefício-custo (B/C);

A Relação Custo-Benefício ou RCB (em inglês, *Cost-Benefit Ratio* ou CBR) é um indicador que relaciona os benefícios de um projeto ou proposta, expressos em termos monetários, e o seus custos, também expressos em termos monetários. Tanto os benefícios como os custos devem ser expressos em valores presentes, equação 3.43.

$$B/C = \frac{\sum \frac{b_t}{(1+d)^t}}{\sum \frac{c_t}{(1+d)^t}} \quad (3.43)$$

A principal desvantagem das avaliações baseadas em RCB é que, por definição, elas ignoram impactos não-monetários. Foram feitas tentativas de sobrepujar estas limitações mediante a combinação da RCB com informações a respeito desses impactos não passíveis de expressão monetária (MOTA 1998).

Viabilidade será indicada com $B/C \geq 1$ e ações podem ser indicadas de acordo com as magnitudes de B/C. O valor encontrado para B/C foi de 2,5.

3.6.3 Taxa interna de retorno (TIR).

A Taxa Interna de Retorno (TIR), em inglês IRR (*Internal Rate of Return*), é a taxa necessária para igualar o valor de um investimento (valor presente) com os seus respectivos retornos futuros ou saldos de caixa.

A solução dessa equação (3.44) pode ser obtida pelo processo iterativo, ou seja "tentativa e erro", ou diretamente com o uso de calculadoras eletrônicas ou planilhas de cálculo. Aqui usou se o excel.

$$VPL = 0 = \sum \left(b_t - \frac{c_t}{(1+TIR)^t} \right) \quad (3.44)$$

Assim, encontrou se TIR de 28%. Valor bem superior à taxa de juros, aqui usada como Taxa Mínima de Atratividade, TMA.

A TIR de um investimento pode ser:

- Maior do que a Taxa Mínima de Atratividade: significa que o investimento é economicamente atrativo.

- Igual à Taxa Mínima de Atratividade: o investimento está economicamente numa situação de indiferença.
- Menor do que a Taxa Mínima de Atratividade: o investimento não é economicamente atrativo, pois seu retorno é superado pelo retorno de um investimento com o mínimo de retorno.

Entre vários investimentos, o melhor será aquele que tiver a maior Taxa Interna de Retorno

Matematicamente, a Taxa Interna de Retorno é a taxa de juros que torna o valor presente das entradas de caixa igual ao valor presente das saídas de caixa do projeto de investimento.

A TIR é a taxa de desconto que faz com que o Valor Presente Líquido (VPL) do projeto seja zero. Um projeto é atrativo quando sua TIR for maior do que o custo de capital do projeto (TORRES, 2000).

Como uma ferramenta de decisão, a TIR é utilizada para avaliar investimentos alternativos. A alternativa de investimento com a TIR mais elevada é normalmente a preferida. Também deve se levar em consideração que colocar o investimento em um banco é sempre uma alternativa. Assim, se nenhuma das alternativas de investimento atingir a taxa de rendimento bancária ou a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), este investimento não deve ser realizado.

Normalmente a TIR não pode ser resolvida analiticamente como demonstrado acima, e sim por meio de iterações, ou seja, fazendo-se interpolações com diversas taxas de retorno até chegar àquela que apresente um VPL igual a zero. Contudo, as calculadoras financeiras e planilhas eletrônicas estão preparadas para encontrar rapidamente este valor.

Apesar de uma forte preferência acadêmica pelo VPL, pesquisas indicam que executivos preferem a TIR ao invés do VPL. Aparentemente os gerentes acham intuitivamente mais atraente pra avaliar investimentos em taxas percentuais ao invés dos valores monetários do VPL. Contudo, deve-se preferencialmente utilizar mais do que uma ferramenta de análise de investimento e todas as alternativas devem ser consideradas em uma análise, pois qualquer alternativa pode parecer valer a pena se for comparada com as alternativas suficientemente ruins.

Deve-se ter em mente que o método da TIR considera que as entradas, ou seja, os vários retornos que o investimento trará, serão reinvestidos a uma taxa igual a taxa de atratividade informada.

Viabilidade será dada quando $TIR \geq d$, mas o ordenamento com base em valores de TIR poderá ser realizado sem considerar d e sim, apenas por seus valores. Entretanto, dependendo da distribuição dos custos e benefícios (por exemplo, bruscas variações em períodos distintos) ao longo do tempo, a TIR pode não ser única. Dessa forma, a escolha de um indicador dependerá das informações desejadas pelo analista e das características das ações em análise.

3.7 Conclusões

Coletores cilindro-parabólicos podem ser construídos com materiais de fácil acesso no mercado local e com custo relativamente baixo. Porém para razões de concentração muito altas estes materiais não devem ser usados, uma vez que suas características se tornam um problema. Um exemplo é o espelhamento da chapa de aço inox. Esse tipo de chapa não é perfeitamente lisa, assim, os raios solares não são refletidos para uma linha como prevê a teoria. São refletidos numa região do espaço, impedindo uma razão de concentração muito alta. Outro problema que se torna importante é a imperfeição na curvatura da chapa (parábola).

Este tipo de coletor tem uma boa aplicabilidade, uma vez que a temperatura de saída da água pode ser controlada pela vazão, dependendo da aplicação que se deseja fazer, mas a eficiência decresce linearmente com o aumento de temperatura de saída do fluido de trabalho.

Foram feitos cálculos para se demonstrar a viabilidade econômica deste tipo de sistema, utilizando-se da taxa interna de retorno (TIR), relação benefício custo (B/C) e valor presente líquido (VPL). Os três indicadores mostraram que o sistema construído é economicamente viável, considerando-se uma taxa de juros de 12% ao ano.

3.8 Bibliografia

AMER, E.H.; NAYAK, J. K; SHARMA, G. K. *Transient test methods for flat-plate collectors: review and experimental evaluation*. Solar Energy, v.60, n. 5, p. 229-243, 1997.

ASHRAE handbook - *Heating, ventilating and air-conditioning systems and equipment*. IP ed. Atlanta: ASHRAE, 1996.

BECKMAN, W. A.; THORNTON, J.; LONG, S.; WOOD, B. D. *Control problems in solar domestic hot water systems*. Solar Energy, v. 53, n. 3, p. 233 – 236, 1994.

BOSANAC, M.; NIELSEN, J. E. *In situ check of collector performance*. Solar Energy, v. 59, n. 4-6; p. 135-142, 1997.

COLLARES-PEREIRA M., *High temperature solar collector with optimal concentrator: Non-focusing Fresnel lens with secondary concentrator*, Solar Energy, 23, 409 (1979).

DAHM, J.; et al. *Evaluation of storage configurations with internal heat exchanges*. Solar Energy, v. 62, n. 6, p. 407 – 417, 1998.

DUFFIE J.A. E BEKMAN W.A., *Solar engineering of thermal processes*, Wiley-Interscience, New York, 1980.

DUNKLE R.V. E COOPER P.I., *A Proposed Method for the Evaluation of Performance Parameters of Flat-Plate Solar Collectors*, paper apresentado em Los Angeles no Meeting of the International Solar Energy Society (1975).

FREEBORNE, W. E. *Control design deficiencies in HUD solar demonstration projects*. ASHRAE Transactions, v. 91, part 2B, p. 147 –155, 1985.

GUAY E.J., *Maximally concentrating collectors for solar energy applications*, Solar Energy, 24, 265 (1980).

HUANG, B. J. *Similarity theory of solar water heater with natural circulation*. Solar Energy, v. 25, p. 105 – 116, 1980.

IQBAL MUHAMMED, *An introduction to solar radiation*, Academic Press, Canada, 1983.

JONCICH, D. M. *Active solar thermal energy systems in the U. S. Army standardization for maximum performance and reliability*. ASHRAE Transactions , v. 97, part 1, p. 189 –193, 1991

KALOGIROU, S. A.; PANTELIOU, S.; DENTSORAS, A. *Modeling of solar domestic heating systems using artificial neural networks*. Solar Energy, v. 65, n. 6, p. 335-342, 1999.

KREITH F. E KREIDER J.F., *principles solar engineering*, McGraw-Hill, Nova Iorque (1978)

LIMA, W.P. *Impactos ambientais do eucalipto*. São Paulo, 2ed. Editora Universidade de São Paulo, 301p.,1996

LOF G.O.G. E DUFFIE J. A., *Optimization of Focusing Solar-Collector Design*, Journal of Engineering. for Power, 85A, 221 (1963).

MOTTA, R.S. *Manual de valoração econômica de recursos ambientais*. Brasília: MMA, 1998

PRADO, R. T. A.; GONÇALVES, O. M. *Gerenciamento de demanda e consumo de energia para aquecimento de água em habitações de interesse social*. São Paulo, PCC/EPUSP, 1992 (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/59).

RABL A., *Comparison of solar concentrators*, Solar Energy, 18, 93 (1976)

SAMANEZ, C. P., *Matemática financeira – Aplicada à análise de investimentos*, 3ª edição, Prentice Hall, SP, 2002.

SOIN R.S., SANGAMEWAR RAO K., RAO D.P. E RAO K.S., *Performance of flat plate solar collector with fluid undergoing phase change*, Solar Energy, 23, 69, 1979.

TORRES, L. V., OLIVEIRA NETO, J. D., KASSAI, J. R., KASSAI, S. *Gestão de custos na cafeicultura – Uma experiência na implantação de projetos*. Texto para discussão – Série para contabilidade. nº 5, 2000.

VAXMAN, M.; SOKOLOV, M. *Effects of connecting pipes in thermosyphonic solar systems*. Solar Energy, v. 37, n. 5, p. 323 – 330, 1986.

WATMUFF J. H., CHARTERS W. W. S. e PROCTOR D., *Solar and wind induced external coefficients solar collectors*, Revue Internationale heliotechnique, n 2, p 56, 1977.

Conclusões gerais

O sistema encontra-se construído, sendo capaz de rastrear regiões com maior radiação. Permite ao operador selecionar as condições para que se realize o rastreamento por meio das teclas de acesso. Oferecendo as opções de rastreamento sob um ou dois eixos de rotação.

O rastreamento se deu com erro médio de $\pm 1^\circ$.

Os painéis fotovoltaicos rastreadores apresentaram eficiência energética superior aos painéis fixos em todos os dias de experimento. Estes resultados asseguraram a viabilidade técnica de painéis solares rastreadores.

O coletor solar concentrador, utilizado para aquecer água, apresentou uma razão de concentração igual a 27 e operou numa faixa de temperatura de 40°C a 105°C . A eficiência deste coletor decresce linearmente com a temperatura. A eficiência de conversão energética variou de 15% a 47%. Sendo 15% para temperatura de operação igual a 105°C e 47% para temperatura de 40°C .

Verificou-se a viabilidade econômica do sistema construído por três métodos e em todos eles o sistema se mostrou economicamente viável.

Apêndice A

4.1 A energia solar

O sol é uma fonte singular de energia renovável situada no centro do sistema solar emitindo energia na forma de ondas eletromagnéticas numa taxa extremamente grande e relativamente constante. A taxa de emissão é equivalente à emitida por um forno de 6050K. Se fosse possível coletar a energia proveniente de 25 hectares da superfície do sol, ter-se-ia energia suficiente para suprir a demanda mundial.

Entretanto isto é impossível, veja três razões. Primeiro, a terra se encontra a uma distância muito grande do sol. Assim, recebe apenas uma fração da energia emitida pela superfície do sol. Segundo, a terra gira e recebe energia apenas uma parte do dia. Terceiro, os efeitos da atmosfera terrestre diminui a intensidade da radiação na superfície terrestre, que, na melhor das hipóteses, causa uma perda de 30%, podendo variar com as condições atmosféricas como no caso de incidência de nuvens que pode ficar dias cobrindo o sol.

A taxa com que a energia solar chega à superfície terrestre é chamada de irradiância solar ou insolação e tem como unidade de medida no sistema internacional de unidades (SI) o Watt por metro quadrado (W/m^2). A irradiância é uma grandeza estocástica. O valor Máximo da irradiância determina o pico de energia que entra no sistema e deve ser usada para a construção do projeto. Se o armazenamento de energia for incluído ao sistema, o projetista deve conhecer também a variação da irradiância no tempo para aperfeiçoar o design do sistema.

Para um projetista de sistemas de coletores solares é também interessante saber quanto de energia chega ao coletor num período de um dia, uma semana ou ano. Este somatório é chamado de radiação ou irradiação. A unidade de medida para radiação solar é joules por metro quadrado (J/m^2), mas também pode ser usado watt-hora por metro quadrado ($W \cdot h/m^2$).

Como é mostrado a seguir, a radiação solar é simplesmente a integração ou o somatório da irradiância solar num dado intervalo de tempo.

4.1.1 A constante solar

A intensidade de radiação na superfície do sol é aproximadamente $6,33 \times 10^7 \text{ W/m}^2$. Como a intensidade cai com o quadrado da distância, na terra esta é de apenas 1367 W/m^2 , como ilustra a figura 4.1.

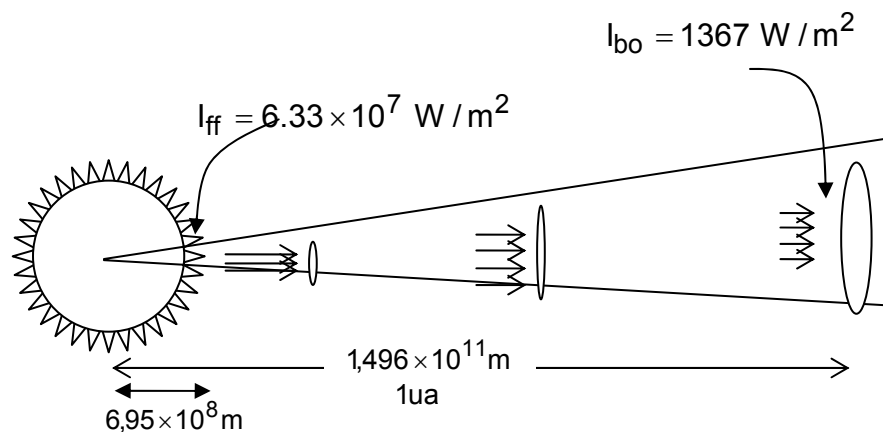


Figura 4.1: Divergente de energia a partir do sol até a terra.

A intensidade de radiação proveniente do sol é relativamente constante. Portanto, a radiação solar, a uma distância de uma unidade astronômica (ua) é chamada de constante solar, I_{bo} , e tem seu valor aceito como 1367 W/m^2 (IQBAL, 1983).

Outros valores para a constante solar são históricos na literatura como, $1,353 \text{ W/m}^2$ aparece em muitas publicações. Estes geralmente trazem discrepâncias devido a erros de calibração de instrumentos de medição. A constante solar pode sofrer variações que não ultrapassam 0,25% para ciclo de 11 anos e para manchas solares nunca são superiores a 1%.

Apesar de a constante solar apresentar variações que são estudadas por terem potencial impacto sobre o clima, ela não é de primeira importância nos coletores solares. É estimado que uma diminuição apenas de 1% possa reduzir em 1°C a temperatura média do planeta e que a terra seria coberta de gelo se a radiação decrescesse de 6%.

O tamanho angular aparente do disco solar pode ser calculado a partir do diâmetro da fotosfera e da distância terra-sol que a 1ua é de 0,553 graus. A distância terra-sol varia de mais ou menos 1,7% devido a sua órbita elíptica.

4.1.2 Espectro solar extra terrestre

O espectro da radiação solar no topo da atmosfera se compara a uma curva de radiação espectral de um corpo negro a 6050K, onde 45% da energia irradiada está compreendida em comprimentos de onda na faixa do espectro visível, normalmente entre 0,3 e 0,7 micrometros. Apenas uma pequena parte, por volta de 1%, encontra-se na faixa de ondas curtas (UV e raios-x) os outros 54% se encontram na região do infravermelho. O espectro solar varia ligeiramente quando atravessa a atmosfera terrestre.

Saber como a energia solar está distribuída nos vários comprimentos de onda permite ao engenheiro avaliar o impacto de fenômenos ondulatórios sobre a energia total coletada.

Para fazer considerações a respeito dos parâmetros dependentes do comprimento de onda (transmitância do vidro, absorbância de uma superfície, ou resposta de foto células) é sempre proveitoso plotar esse parâmetro versus uma escala representando a porcentagem de energia solar contida naquele comprimento de onda. A área sobre a curva representa a porcentagem total de energia de todos os comprimentos de onda. Uma escala não linear representando os comprimentos de onda também pode ser incluída. Assim, a dependência desse parâmetro com o comprimento de onda fica visualmente mostrada.

4.1.3 Irradiância solar extraterrestre

A constante solar é um parâmetro usado para caracterizar a entrada de radiação solar no topo da atmosfera sendo variável ao longo do ano devido a efeitos astronômicos como órbita da terra em torno do sol, manchas solares e ainda é função do comprimento de onda emitido, estudados em um novo enfoque da ciência, climatologia espacial (MARTINS et. al., 2004).

Devida a órbita ligeiramente elíptica, a intensidade da radiação solar recebida fora da atmosfera terrestre varia mais ou menos 3,4%, com irradiância

máxima ocorrendo no periélio (3-5 de janeiro) e o mínimo no afélio (5 de julho). Esta variação pode ser estimada na equação 4.1.

$$I_{bo,n} = I_{bo} \left[1 + 0,034 \cos \left(\frac{360n_j}{365,25} \right) \right] (W / m^2) \quad (4.1)$$

em que,

$I_{bo,n}$ = irradiância solar fora da atmosfera terrestre, W/m^2 ;

n_j = dia Juliano (começando em 1º de janeiro).

Um conceito sempre usado nos modelos de irradiância solar é que a irradiância solar extraterrestre é aquela incidente sobre uma superfície horizontal, considerando-se uma superfície plana fora da atmosfera terrestre paralela ao solo, onde a face desta superfície (normal ao raio central) fica voltada para o sol e recebe $I_{bo,n}$ o máximo possível de radiação solar.

Se a superfície não é normal aos raios solares, a irradiância sobre ela será reduzida com o cosseno do ângulo entre o vetor normal e o vetor que aponta diretamente para o centro do sol. Este conceito é ilustrado na Figura 4.2, onde se pode ver que a taxa em que a energia incidente em ambas as superfícies é a mesma. Entretanto a área da superfície A é grande em relação à sua projeção, superfície hipotética B, fazendo com que a quantidade de energia incidente por unidade de área em A seja menor que em B.

A irradiância solar extraterrestre sobre uma superfície paralela ao solo é dada pela Equação 4.2.

$$I_{bo,h} = I_{bo,n} \cos \theta_z \quad (4.2)$$

em que,

$I_{bo,h}$ = irradiância solar extraterrestre sobre uma superfície horizontal, em W/m^2 ;

θ_z = ângulo entre as duas superfícies, que é o mesmo ângulo que os raios solares fazem com a normal à superfície terrestre, conhecido como ângulo zenital. A relação entre a radiação da radiação pelo cosseno do ângulo zenital da origem ao que é chamado de efeito cosseno. O efeito cosseno é um conceito extremamente importante na otimização da orientação de coletores solares.

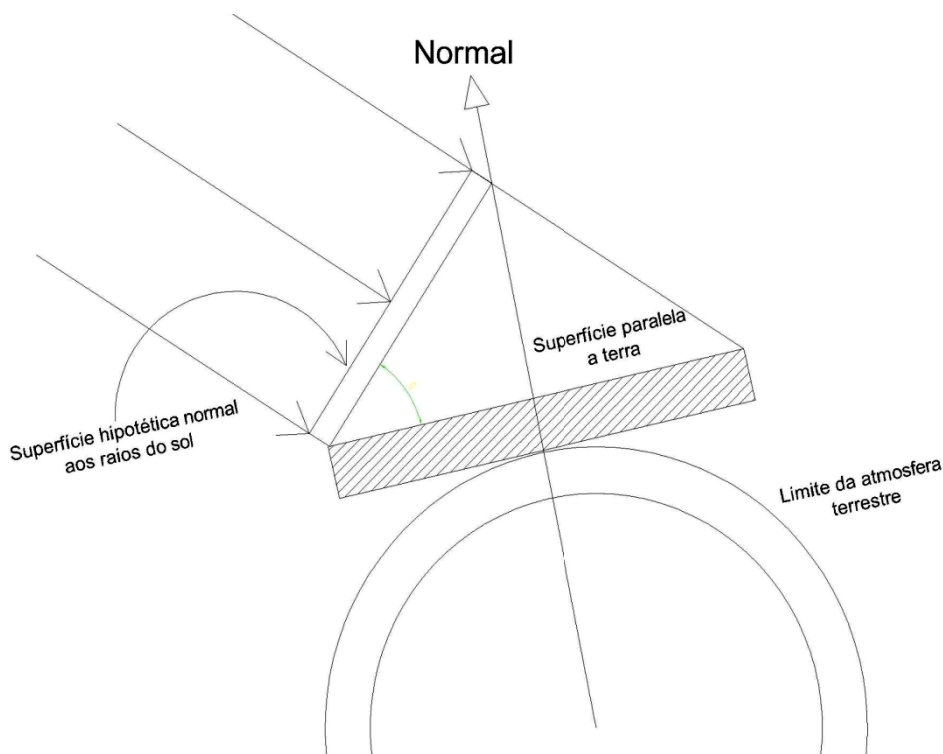


Figura 4.2: O efeito cosseno e a irradiância extraterrestre

Devido ao efeito cosseno, a irradiância solar extraterrestre sobre uma superfície horizontal varia ciclicamente com a rotação da terra em torno de seus eixos.

A irradiância solar que incide na superfície da terra dependerá destes efeitos, além de outros associados à interação da radiação eletromagnética com os constituintes da atmosfera da terra. A transmissão da radiação solar na atmosfera é um processo complexo e de difícil descrição devido ao grande número de propriedades físicas da atmosfera que a influenciam.

A razão entre a irradiância solar na superfície terrestre e no topo da atmosfera é definida como transmitância atmosférica (Equação 4.3).

$$\tau_h = \frac{I_G}{I_{bo}} \quad (4.3)$$

em que,

τ_h = transparência atmosférica, adimensional;

I_G = irradiância solar global, em watt por metro quadrado;

I_{bo} = irradiância solar no topo da atmosfera, em watt por metro quadrado

Ao atravessar a atmosfera, a radiação eletromagnética é atenuada por processos de espalhamento e absorção causados pelas partículas (denominados aerossóis) e moléculas de gases atmosféricos. Assim quando chega à superfície a radiação solar global apresenta duas componentes, a difusa (espalhada pela atmosfera) e direta (não espalhada pela atmosfera). Assim a irradiância solar global será dada pela Equação 4.4.

$$I_G = I_d + I_e \quad (4.4)$$

em que,

I_G = irradiância solar global, em watt por metro quadrado;

I_d = irradiância solar direta, em watt por metro quadrado;

I_e = irradiância solar difusa, em watt por metro quadrado.

As relações geométricas entre um plano em uma orientação particular num dado instante e a radiação direta incidente (que é a posição relativa do sol em relação ao plano) foram descritas em termos de uma série de ângulos (DUFFIE & BEKMAN, 1980). Figura 4.3.

A equação 4.5 relaciona o ângulo de incidência e os outros ângulos.

$$\cos \theta = \text{sen} \delta \text{sen} \varphi \cos \beta - \text{sen} \delta \cos \varphi \text{sen} \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \text{sen} \varphi \text{sen} \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \text{sen} \beta \text{sen} \gamma \text{sen} \omega \quad (4.5)$$

em que

φ = Latitude, que é a localização angular ao norte ou ao sul do equador, assumindo valores positivos para o norte $-90^0 \leq \varphi \leq 90^0$;

δ = Declinação solar, é a posição angular do sol em relação ao equador sendo positivo para o hemisfério norte e negativo para hemisfério sul $-23,45^0 \leq \delta \leq 23,45^0$;

β = Inclinação, ou seja, o ângulo entre a superfície considerada e a horizontal no local $0^0 \leq \beta \leq 180^0$ ($\beta > 90^0$ o plano está coma a face voltada para baixo);

γ = Azimute da superfície é o ângulo formado entre a projeção do sol e da normal à superfície no plano horizonte local;

ω = Ângulo horário, desvio do sol a oeste ou a leste do meridiano local devido a rotação da terra. Negativo pela manhã e positivo a tarde.

θ_z = Ângulo de incidência é o ângulo entre o feixe de radiação e a normal ao horizonte local (zênite).

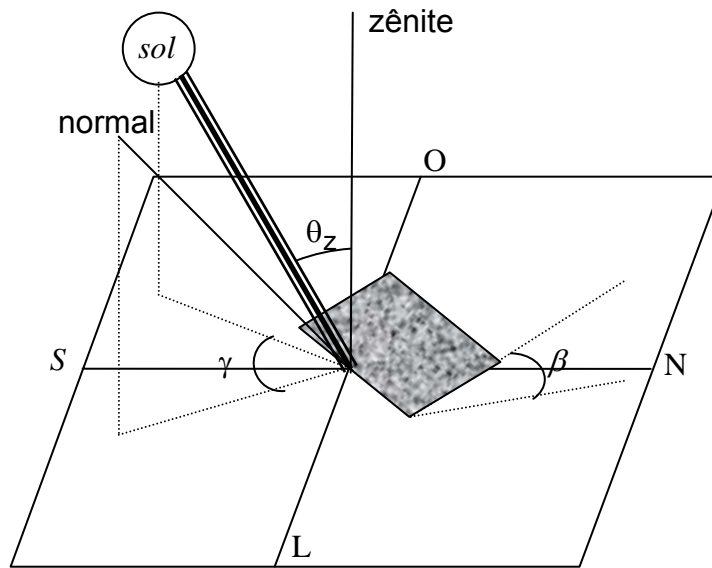


Figura 4.3: Azimute, ângulo de incidência e ângulo de inclinação do plano.

A declinação solar, δ , pode ser estimada por meio da equação 4.6, de COOPER (1969).

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left[360 \cdot \frac{(284 + n_j)}{365} \right] \quad (4.6)$$

em que n_j é o enésimo dia do ano, conhecido como dia Juliano.

Ao penetrar na atmosfera a radiação solar atravessa uma massa de ar m (caminho óptico). A espessura da camada de ar varia com o ângulo de incidência da radiação (ângulo θ_z) da seguinte forma (Equação 4.7):

$$m = (\cos \theta_z)^{-1} \quad (4.7)$$

Esta relação é válida para $0 < \theta_z < 70^\circ$, para ângulo de incidência maior que setenta graus a relação acima começa a apresentar desvio significativo (ROBINSON, 1966 E KONDRATYEV, 1969).

O somatório da radiação solar recebida sobre uma superfície horizontal no topo da atmosfera forma um limite superior para energia total que incide sobre uma superfície horizontal abaixo da atmosfera, mas sem a complicação da massa de ar e cobertura por nuvens.

A energia total incidente sobre uma superfície num dado período de tempo é encontrada por integração (ou somatório) da irradiância solar neste

intervalo de tempo. Esta soma é chamada de radiação solar e tem unidade de energia por unidade de área.

É sempre interessante determinar a energia total que incide sobre uma superfície ao longo do dia. A radiação solar extraterrestre sobre uma superfície horizontal dado por H_{oh} pode ser calculada a partir de valores instantâneos da irradiância solar extraterrestre através da Equação 4.8.

$$H_{oh} = \int_{n_s}^{p_s} I_{bo,h} dt \quad (4.8)$$

Onde o tempo é medido em segundos e varia do sol nascente (n_s) até o pôr do sol (p_s). Usando as relações geométricas terra-sol foi possível desenvolver uma expressão para o cálculo da radiação solar extraterrestre sobre uma superfície paralela à terra, representada pela equação 4.9.

$$H_{o,h} = \frac{86400 I_{bo}}{\pi} (\omega_s \cdot \sin \phi \sin \delta + \cos \delta \cdot \cos \phi \sin \omega_s) \quad (J/m^2) \quad (4.9)$$

Onde, ω_s , é o ângulo horário do por do sol dado em função da declinação solar e latitude (equação 4.10).

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \delta) \quad (4.10)$$

Todos estes ângulos e tem unidade de radianos nesta equação. Desde que a constante 86400 tenha unidade de segundos a unidade da irradiância solar extraterrestre I_{bo} deve ser Watt por metro quadrado (W/m^2).

Valores da radiação solar extraterrestre sobre uma superfície horizontal para um período de um ano, para três latitudes, usando a equação 3 são mostrados na Figura 4.4. Esta figura mostra pontos interessantes sobre a energia que recebemos do sol. Note que o maior valor de energia incidente diária ocorre em latitude norte no verão. Também pode perceber que no equador a radiação mais alta ocorre na primavera e no outono (nos equinócios) e não no verão como poderia se esperar. O valor máximo ocorre no verão apenas para latitudes acima de 23,5 graus.

A energia total acumulada em um ano é a integral da radiação solar mostrada na figura 4.4. Como pode se esperar, o somatório da radiação solar

sobre uma superfície horizontal é maior no equador. Superfícies em grandes latitudes perdem muita energia com o efeito cosseno, discutido anteriormente.

Se a superfície é colocada voltada para o sol (mas considerando-a fora da atmosfera) a radiação solar extraterrestre varia como mostra a figura 4.5. Quando a latitude aumenta em direção ao norte, maior será a energia disponível no verão e menor no inverno.

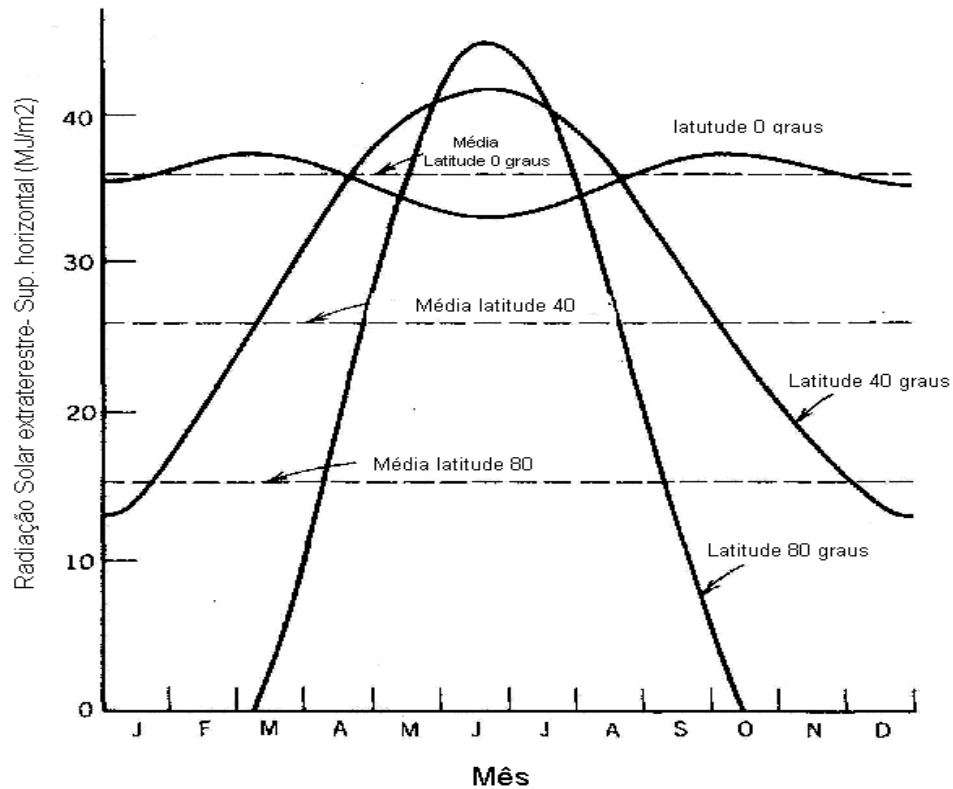


Figura 4.4: Variação sazonal da radiação solar extraterrestre diária incidente sobre uma superfície horizontal fora da atmosfera terrestre. Adaptado de (STINE & GEYER, 2001).

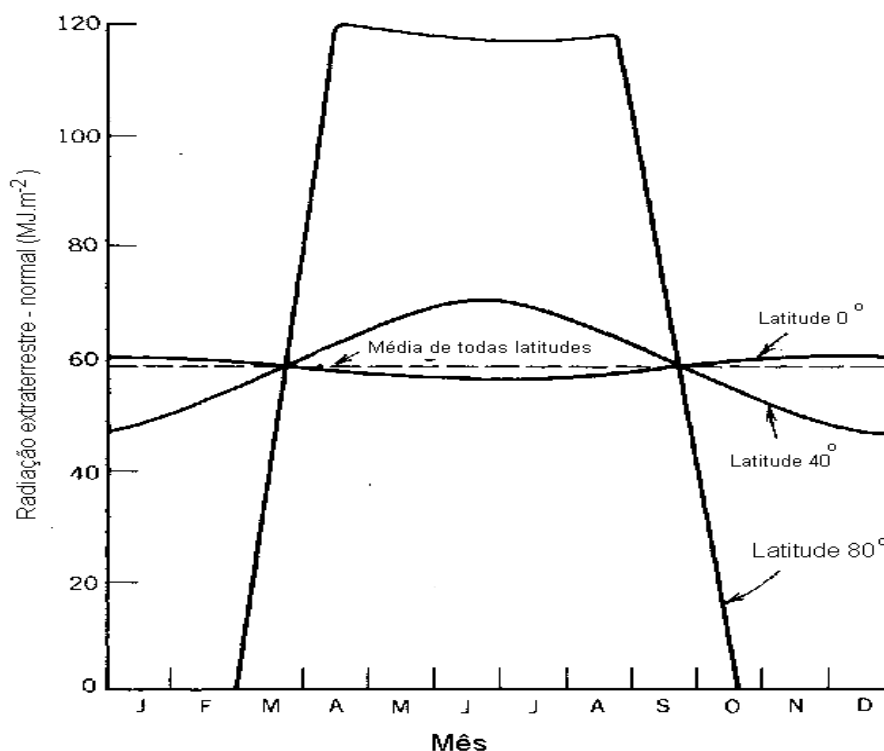


Figura 4.5: Variação sazonal da radiação solar extraterrestre diária incidente sobre uma superfície colocada normal aos raios solares, fora da atmosfera terrestre. Retirado de (STINE & GEYER, 2001).

Ainda percebe-se que a radiação solar anual sobre uma superfície mantida perpendicular aos raios solares é essencialmente a mesma para todas as latitudes. Isso acontece porque em qualquer lugar a terra recebe 4380 horas de radiação. Entretanto existe uma diferença na radiação solar durante o inverno, aumentando 6% para o verão, mas a média anual se mantém constante.

Nota-se também que a média anual corresponde ao valor de radiação de um dia com duração de 12 horas. O que corresponde a $59,1\text{MJ}/\text{m}^2$. Comparando a figura 4.4 com a figura 4.5 percebe-se que o efeito cosseno reduz a radiação solar sobre a superfície horizontal em 39% no equador, 52% para uma latitude de 40 graus e até 74% para uma latitude de 80 graus.

É importante estudar a radiação solar sobre uma superfície hipotética acima da atmosfera terrestre porque dá uma idéia dos efeitos da mecânica do sistema terra-sol sobre a energia recebida. A seguir são mostrados os efeitos da atmosfera terrestre (vapor d'água, dióxido de carbono, nuvens, neblina e particulados) sobre a radiação solar abaixo da atmosfera.

4.2 Características da radiação solar ao nível do solo

A medida que a radiação atravessa a atmosfera, esta é absorvida, refletida, espalhada e transferida diretamente.

Na superfície da terra o sol tem baixa intensidade, uma cor diferente e uma forma diferente do observado acima da atmosfera.

A atmosfera causa uma redução na irradiação solar em torno de 30% em um dia claro e aproximadamente 90% em dias muito nublados.

A figura 4.6 ilustra a quantidade de energia absorvida e espalhada (refletida e difundida) causada por diferentes componentes atmosféricos.

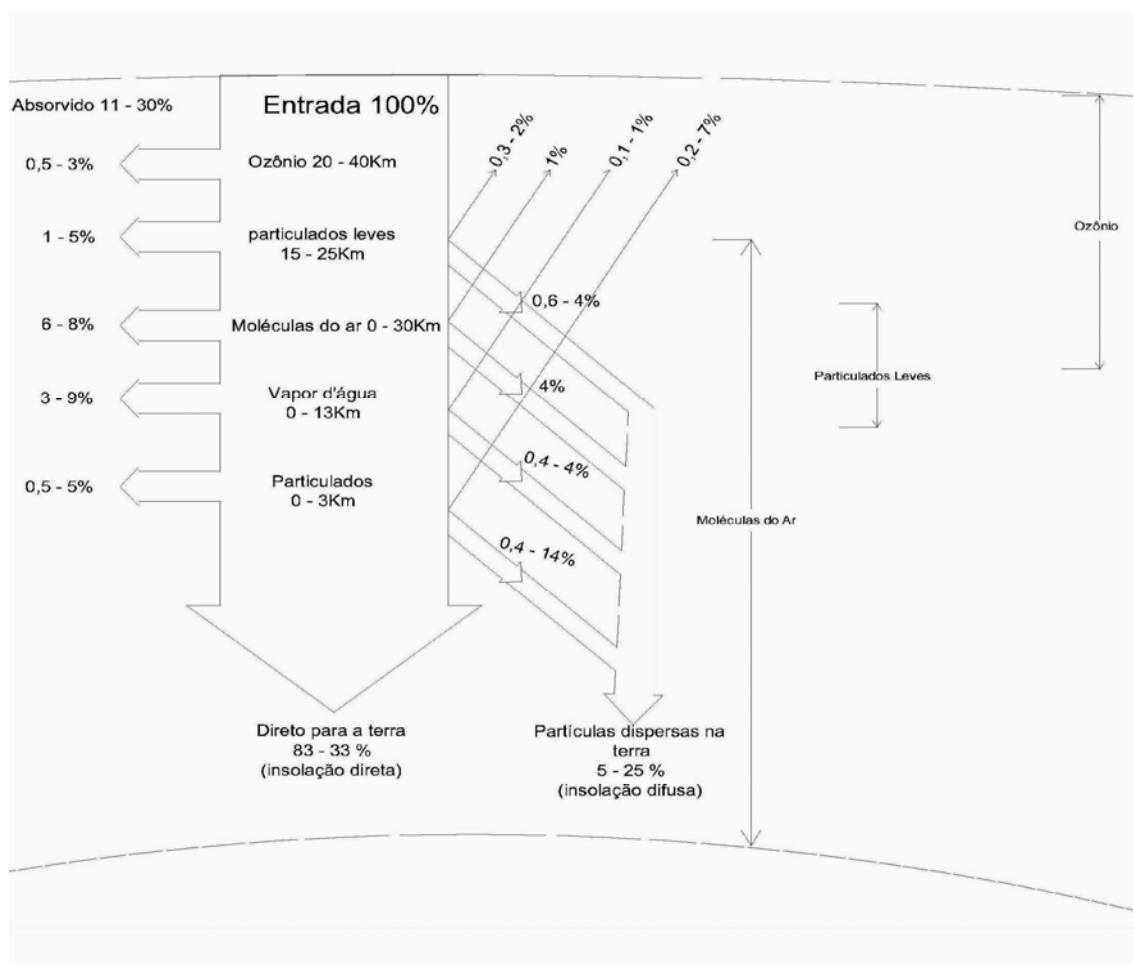


Figura 4.6: Absorção e espalhamento da energia solar incidente na atmosfera. Valores típicos para uma massa de ar.

4.2.1 Radiação direta sobre uma superfície em movimento

Até aqui foi apresentada uma metodologia para estimar a radiação solar sobre superfícies fixas, como janelas, coletores planos ou superfícies

inclinadas. O mais importante para o presente trabalho é estimar a intensidade da radiação sobre superfícies que seguem caminhos predeterminados.

Os coletores concentradores utilizam mais efetivamente a radiação direta, portanto é necessário que mantenham suas faces voltadas para o sol e para isso é interessante que se tenha pelo menos dois eixos de rotação, um para corrigir a declinação solar e outro para corrigir o ângulo horário.

A irradiância solar direta sobre uma superfície em qualquer instante pode ser estimada por meio da equação 4.11.

$$I_d = I_{b0} \tau_H \cos \theta \quad (4.11)$$

em que $\cos \theta$ é calculado pela Equação 4.5.

O principal problema da equação (4.11) é a determinação da transmitância atmosférica para a radiação, τ_H . Hottel, em 1976, apresentou um método para estimar a transmitância atmosférica (equação 4.12) (HOTEL citado por VIANELLO, 1991).

$$\tau_H = a_0 + a_1 e^{\frac{-k}{\cos \theta}} \quad (4.12)$$

em que, τ_H é a transmitância atmosférica de Hotel; a_0 , a_1 e k são constantes de Hotel para uma atmosfera típica, com 23 km de visibilidade e podem ter seus valores estimados a_0^* , a_1^* e k^* , para altitudes inferiores a 2,5 km, pelas equações 4.13, 4.14 e 4.15.

$$a_0^* = 0,4237 - 0,00821(6 - A)^2 \quad (4.13)$$

$$a_1^* = 0,5055 + 0,00595(6,5 - A)^2 \quad (4.14)$$

$$k^* = 0,2711 + 0,01858(2,5 - A)^2 \quad (4.15)$$

em que,

A é altitude do local observado em quilômetros.

Para viçosa-MG a altitude é igual 0,65 km o que resulta nos coeficientes de Hotel $a_0^* = 0,189$, $a_1^* = 0,709$ e $k^* = 0,335$.

4.3 Bibliografia

COOPER P.I., *The Absorption of Solar Radiation in Solar Stills*, Solar Energy, 12, 3 (1969).

DUFFIE J.A. e BEKMAN W.A., *Solar engineering of thermal processes*, Wiley-Interscience, New York, 1980.

HOTTEL H.C., *A Simple Model for Estimating the Transmittance of Direct Solar Radiation Through Clear Atmospheres*, Solar Energy, 18, 129 (1976).

IQBAL MUHAMMED, *An introduction to solar radiation*, Academic Press, Canada, 1983.

KONDRATYEV K.Y., *Radiation in the atmosphere*, Academic Press, Nova Iorque e Londres, 1969.

MARTINS F.R., PEREIRA E.B. E ECHER M.P., *Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário – o Projeto Swera*, Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 2, p. 145 - 159, (2004).

ROBINSON, N. (ed.), *Solar Radiation*, Elsevier, Amsterdam (1966).

STINE W. E GEYER M., *Power from the Sun Solar*, Energy Industries Association – SEIA, livro *online* disponível em: <http://www.powerfromthesun.net/book.htm> (acessado agosto de 2005).

STINE WILLIAM B. e GEYER MICHAEL, *Power From The Sun*, livro eletrônico disponível em <http://www.powerfromthesun.net/book.htm>, acessado em 20 de fevereiro de 2009.

THEKAEKARA M.P., *Solar radiation measurement: Techniques and instrumentation*, Solar Energy, 18, 309 (1976).

VIANELLO R. L. e ALVES A. R., *Meteorologia básica e aplicações*, Imprensa universitária, Viçosa, 1991.

Apêndice B

5.1 Radiação global sobre superfícies e simulações

Como já foi dito, a radiação solar ao atravessar a atmosfera sofre atenuações. Dessa forma, a radiação global chega à superfície dividida em componentes, direta e difusa. VIANELLO & ALVES (1991), afirmam que a irradiância solar direta pode ser estimada por meio da equação 5.1.

$$I_d = I_{bo} \left(\frac{\bar{r}}{R} \right)^2 \tau_{hv} \quad (5.1)$$

em que,

I_{bo} = constante solar, em W / m^2 ;

R = distância terra-sol, em m;

\bar{r} = distância média a terra e o sol;

τ_{hv} = transmitância atmosférica, adimensional.

A transmitância atmosférica é dada pela equação 5.2.

$$\tau_{hv} = \exp \left[-0,08 \left(\frac{p \text{ m}}{1013} \right)^{0,75} - 0,174 \left(\frac{w_a \text{ m}}{20} \right)^{0,60} - 0,083 (d \text{ m})^{0,90} \right] \quad (5.2)$$

em que:

p = pressão atmosférica em (mb);

m = massa ótica de ar (adimensional);

w_a = quantidade de água precipitável na atmosfera (mm);

d = parâmetro adicional de poeiras.

A quantidade de água precipitável é dada pela fórmula de Hann (Equação 5.3) e a massa ótica de ar, que varia com o ângulo zenital do sol (θ_z), pode ser estimada pela equação 5.4.

$$m_b = 35 \left(1224 (\cos \theta_z)^2 \right)^{-1/2} \quad (5.3)$$

$$w_a = 2,5 P_v \quad (5.4)$$

em que,

P_v é a pressão de vapor d'água em milibars.

Para Viçosa-MG, o valor encontrado de w_a foi 0,41, para junho.

A irradiância solar difusa é dada por:

$$I_e = K_e (I_{dw} - I_d) \cos \theta_z \quad (5.5)$$

em que,

K_e é o coeficiente empírico, que para o Congo, por exemplo, obteve-se:

$$K_e = \frac{1}{2} (\cos \theta_z)^{1/3} \quad (5.6)$$

A irradiância solar direta sobre uma superfície normal aos raios ao nível do solo, considerando apenas o vapor d'água como agente atenuador pode ser estimada por:

$$I_{dw} = I_{do} \left(\frac{\bar{r}}{r} \right)^2 [0,938 \exp(-0,0154 w_a \text{ m}) + 0,004 (w_a \text{ m})^{2,1} - 1,1086 \times 10^{-5} (w_a \text{ m})^3 + \frac{[121,948(1 + w_a \text{ m})]}{[1 + 10(w_a \text{ m})^2]}] \quad (5.7)$$

em que,

w_a é expresso em milímetros.

Usando-se as equações acima foi possível fazer uma simulação utilizando se o *software mathematica* e avaliar as diferenças entre a intensidade de radiação incidente sobre superfícies horizontais fixas, inclinadas fixas e móveis sob dois graus de liberdade. Os resultados foram apresentados nas Figuras 5.1 e 5.2.

Os resultados apresentados nas figuras 5.1 e 5.2 mostram a quantidade de energia disponível a coletores solares para as latitudes de 0°, 10°, 20°, 30° e 40°. Sendo os mostrados na Figura 5.1 relativos a superfícies fixas e os resultados mostrados na Figura 5.2 relativos à superfícies com dois graus de liberdade.

A Figura 5.3 apresenta a diferença de energia disponível a uma superfície rastreadora com dois graus de liberdade em relação a uma superfície horizontal para cada latitude respectivamente.

5.2 Resultado das simulações

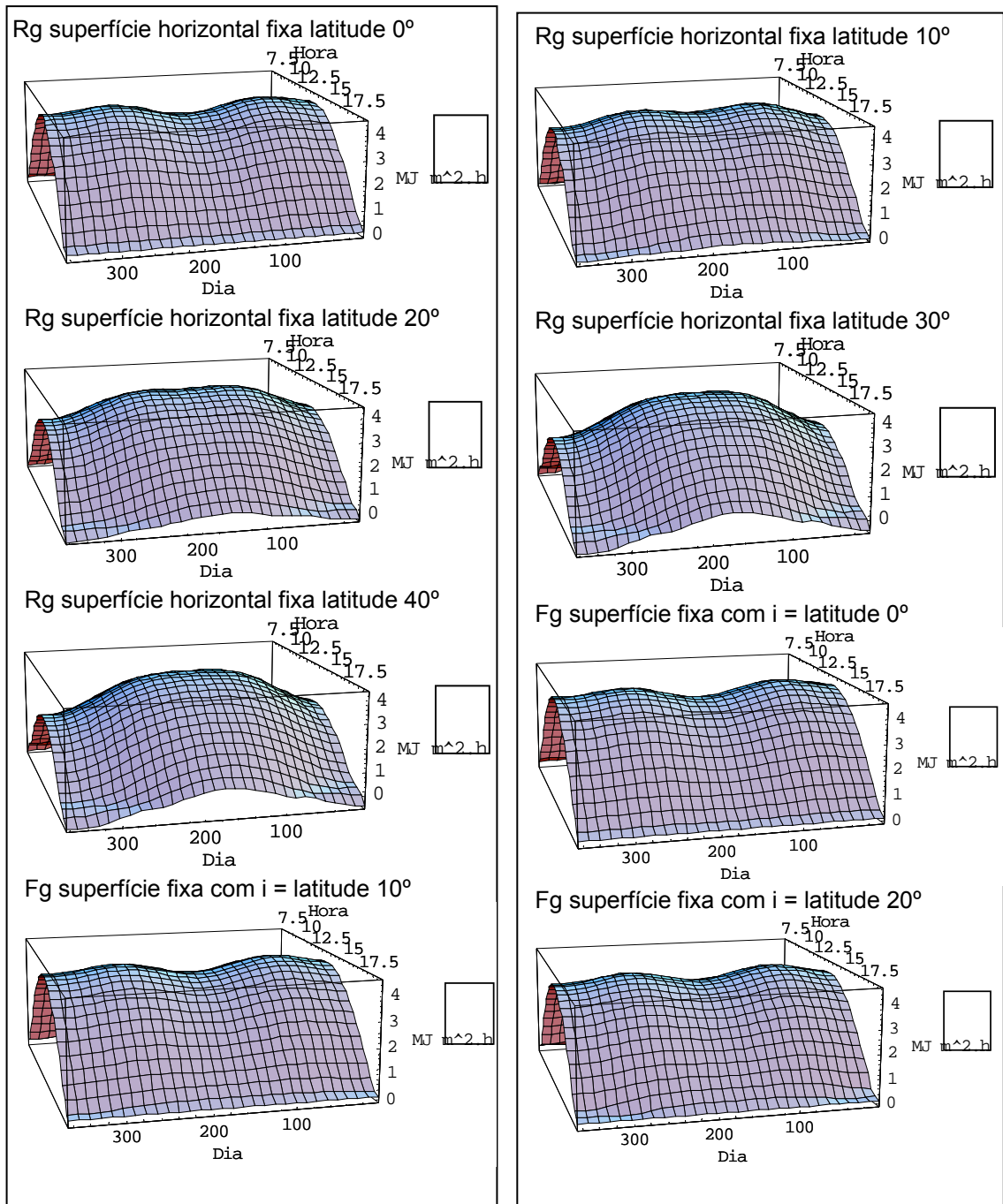


Figura 5.1: Simulação a radiação solar sobre superfícies horizontais fixas e superfícies inclinadas fixas para as latitudes 0°, 10°, 20°, 30° e 40°.

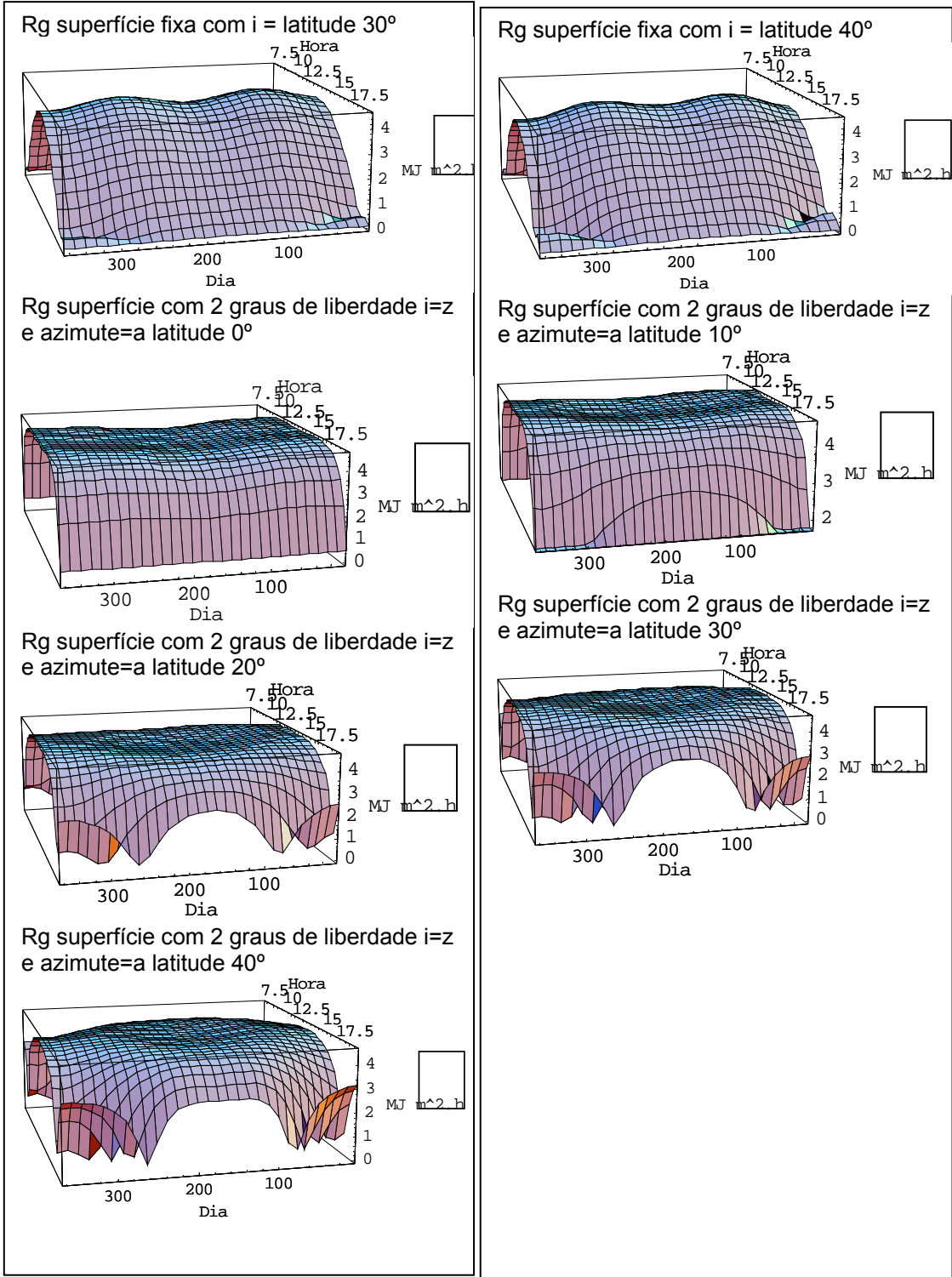


Figura 5.2: Radiação solar sobre superfícies moveis para um e dois graus de liberdade.

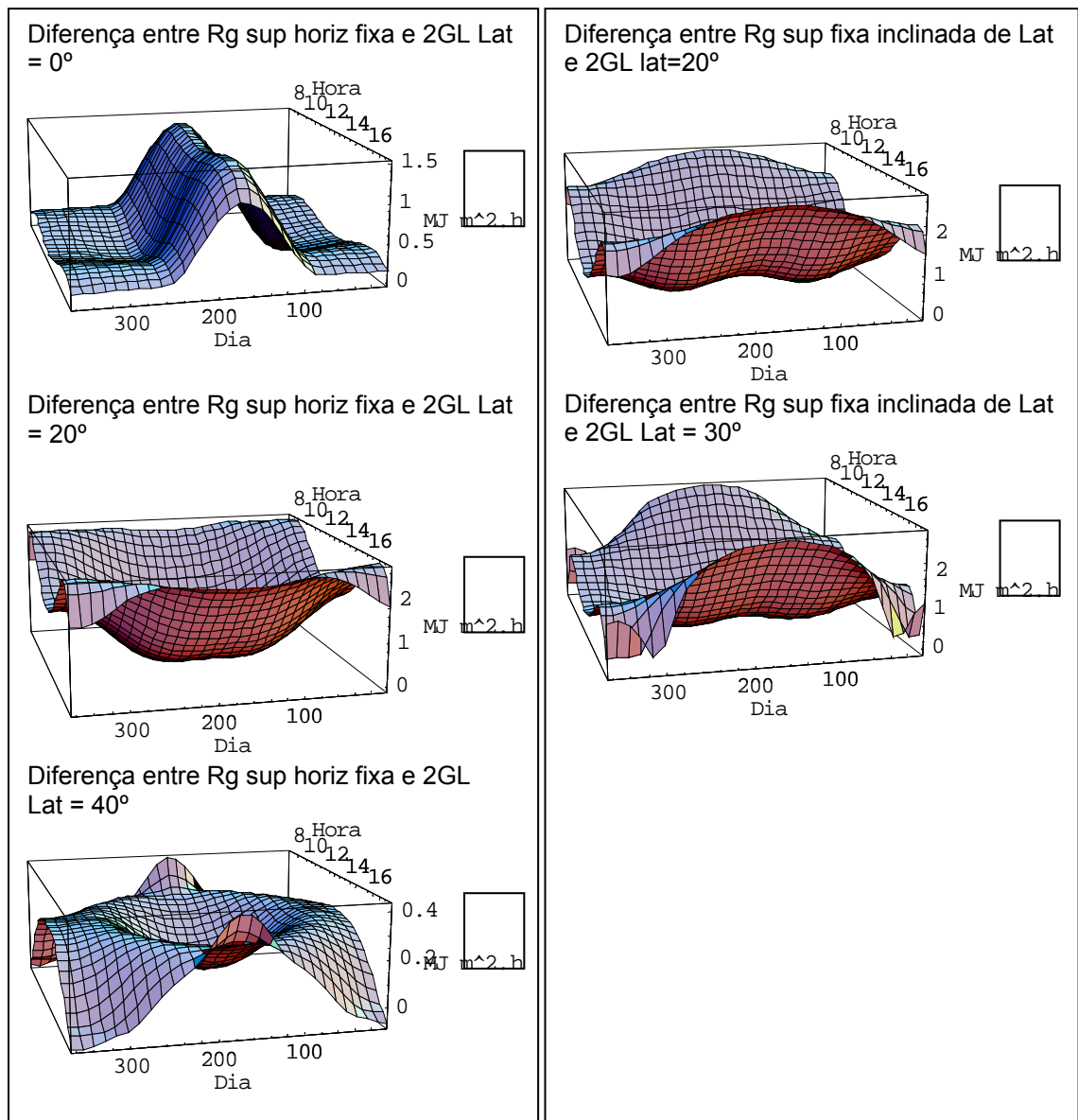


Figura 5.3: Diferença entre gráficos da figura 5.1 e 5.2.

Pela análise dos cinco gráficos mostrados na Figura 5.3 fica clara a diferença entre o nível de radiação em superfícies fixas e superfícies móveis que rastreiam o sol.

É evidente que no modelo simulado não se considerou o aparecimento de nuvens e também, pressão atmosférica, água precipitável e parâmetro de poeiras foram considerados constantes. Embora todos estas grandezas são variáveis e participam da atenuação da radiação solar.

Outros fatores que podem influenciar na radiação recebida por uma superfície são possíveis erros e o consumo de energia do rastreador real.

DUFFIE e BECKMAN (1974), apresentam o efeito da orientação de uma superfície na radiação anual incidente para latitude de 35° norte, do sudoeste dos Estados Unidos (quadro abaixo).

Orientação da superfície	Radiação	
	10 ⁶ kJ/m ²	%
1. Horizontal fixa.	5,34	100
2. Fixa, com inclinação igual a da latitude.	6,19	115,9
3. Variável com ajuste contínuo no eixo norte-sul.	7,43	139,1
4. Variável, com ajuste contínuo no eixo paralelo ao eixo da terra.	8,14	152,4
5. Ajuste contínuo sobre os dois eixos para manter os raios solares perpendiculares à superfície.	8,38	156,9

Conforme é mostrado no Quadro, a orientação da superfície influencia na radiação anual incidente (considerando a nebulosidade). Nesse caso, a radiação solar incidente numa superfície horizontal fixa foi de $5,34 \times 10^6$ kJ/m² (100 %), em superfície com inclinação igual à latitude do local, $6,19 \times 10^6$ kJ/m² (115,9 %), já numa superfície com ajuste contínuo no eixo paralelo ao eixo da terra, a radiação incidente foi de $8,14 \times 10^6$ kJ/m² (152,4 %) (JESUZ e OLIVEIRA FILHO, 2000).

5.3 Bibliografia

DUFFIE J.A. e BEKMAN W.A., *Solar engineering of thermal processes*, Wiley-Interscience, New York, 1980.

IQBAL MUHAMMED, *An introduction to solar radiation*, Academic Press, Canada, 1983.

JESUZ, JULIO CESAR de; OLVEIRA FILHO, Delly. *Sistema de rastreamento automático para painéis fotovoltaicos*. In: Primeiro Seminário Energia na Agricultura, 2000.

VIANELLO R. L. e ALVES A. R., *Meteorologia básica e aplicações*, Imprensa Universitária, Viçosa, 1991.