

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM GERADOR FOTOVOLTAICO
COM SEGUIDOR SOLAR AZIMUTAL

Maurício Madeira Oliveira

2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM GERADOR FOTOVOLTAICO
COM SEGUIDOR SOLAR AZIMUTAL

por

Maurício Madeira Oliveira

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, setembro de 2008

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM GERADOR FOTOVOLTAICO
COM SEGUIDOR SOLAR AZIMUTAL

por

Maurício Madeira Oliveira
Licenciado em Matemática

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Aprovada por:

Prof. Dr. Eduardo André Perondi - UFRGS

Prof. Dr. João Carlos Verneti dos Santos - ULBRA

Prof. Dr. Mario Henrique Macagnan - UNISINOS

Prof. Dr. Flávio José Lorini
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 24 setembro de 2008.

À minha esposa Helida pelo seu grande amor em tantas existências.
Aos nossos filhos amados, Tiago, Lucas e Gabriel.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Professor Arno Krenzinger, por sua paciência, atenção e ensinamentos transmitidos durante o desenvolvimento desta dissertação.

Aos colegas do Laboratório de Energia Solar, Luis Vera, César, Alexandre, Giuliano, João Batista, Rafael e estagiários, agradeço pela ajuda e amizade.

Ao Beto, pelas sugestões na mecânica do seguidor solar e por sua amizade.

Ao meu irmão Sérgio, pela eterna amizade e amor.

Aos irmãos amados, Marlova, Mara, Nori, Cláudia e Duda.

A minha irmã amada Glaci.

Agradeço aos amigos e irmãos, que nesta jornada na mãe Terra me acolhem com tanto amor e carinho.

RESUMO

A conversão de radiação solar em energia elétrica por sistemas fotovoltaicos tem se intensificado nos últimos anos. Em sistemas autônomos ou conectados à rede elétrica, a estrutura de instalação dos módulos fotovoltaicos é geralmente fixa e com inclinação igual à latitude local. Uma importante parcela de instalações está utilizando seguidores solares de um ou dois eixos e apresentam um aumento significativo na produtividade do sistema.

Este trabalho descreve a montagem de um seguidor solar azimutal (eixo vertical móvel) aplicado a módulos fotovoltaicos e compara a produção energética do mesmo com um sistema fixo. Os parâmetros monitorados para comparação foram: corrente fotogerada pelo sistema fixo e móvel, irradiância sobre o conjunto fixo e móvel, radiação global e temperatura dos módulos. Ambos os sistemas foram montados com inclinação igual à latitude local (30°). O ganho energético com a utilização do seguidor azimutal chegou a 24% em dias de céu parcialmente limpo, quando ocorre alto índice de radiação direta.

O seguidor solar foi desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da UFRGS, incluindo parte mecânica e controle eletrônico (hardware e software) do equipamento. O seguimento solar é realizado a cada 15 minutos ($3,75^\circ$), um sensor óptico com haste de sombreamento determina se o conjunto está voltado para o Sol. A posição de retorno (leste) no final do dia, $\frac{1}{2}$ dia (norte) e final de curso (oeste) é determinada por sensores magnéticos. O aumento de produtividade alcançado pelo conjunto com seguimento solar em períodos fora do central (das 11h às 13h) chegou a 38% em relação ao fixo.

Foi utilizado um conjunto de equações para gerar curvas teóricas de irradiância sobre um plano inclinado fixo ou móvel a partir da radiação global horizontal medida. Os resultados foram comparados com curvas de irradiância geradas a partir de medidas feitas por células de referência mostrando concordância.

ABSTRACT

Analysis of the Performance of an Azimuthal Solar Tracking Photovoltaic Generator

The conversion of solar radiation into electricity by photovoltaic systems has been intensified in the last years. In stand-alone or grid-connected systems, the structure of installation of photovoltaic modules is generally fixed and with an inclination equal to the local latitude. A significant number of installations are employing solar tracking along one or two axes with significant increase in the productivity of the system.

This work describes the development of an azimuthal solar tracker (vertical axis mobile) applied to photovoltaic modules and compares its production of energy with a fixed system. The monitored parameters in both systems were electric current, horizontal and tilted irradiances, as well the temperature of the PV modules. Both systems were installed with an inclination equal to local latitude (30°). The energy gain with the use of azimuthal tracker reached 24% in days of partially clear sky, when there is a high rate of direct radiation.

The solar tracker was developed at the Laboratório de Energia Solar at UFRGS, including the mechanical and electronic control (hardware and software) equipment. The tracking is performed at every 15 minutes, corresponding to 3.75° . An optical sensor determines whether the set is falling to the Sun. The return position (east) at the end of the day, noon (north) and end of course (west) is determined by magnetic sensors. The productivity increase reached by the sun tracker along tracking periods outside the central hours (11h to 13h) reached 38% in relation to the fixed system.

A set of equations were used to generate irradiance curves on a theoretical plane, fixed or mobile, from the measured global horizontal radiation. The theoretical results agree with curves of irradiance obtained from measurements made with reference cells.

Índice

| | | |
|-----------|---|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | Motivação..... | 1 |
| 1.2 | Objetivos da dissertação..... | 2 |
| 1.3 | Escopo da dissertação..... | 2 |
| 2. | SEGUIDOR SOLAR | 4 |
| 2.1 | Princípio..... | 4 |
| 2.2 | Tipos de seguidores solares | 4 |
| 2.2.1 | Movimento sobre eixo horizontal (orientação leste-oeste)..... | 4 |
| 2.2.2 | Movimento sobre eixo horizontal (orientação sul-norte)..... | 7 |
| 2.2.3 | Seguidor polar (um eixo móvel norte-sul)..... | 8 |
| 2.2.4 | Seguidor com eixo vertical móvel (azimutal)..... | 10 |
| 2.2.5 | Seguidor com dois eixos móveis (vertical e horizontal)..... | 13 |
| 2.3 | Métodos de posicionamento de equipamentos de seguimento solar..... | 14 |
| 2.4 | Revisão bibliográfica..... | 16 |
| 3. | RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE EM PLANOS DE DIFERENTES ORIENTAÇÕES | 20 |
| 3.1 | A radiação solar..... | 20 |
| 3.2 | Radiação solar na superfície terrestre..... | 27 |
| 3.3 | Cálculo da irradiação sobre uma superfície fixa ou em movimento (inclinada), a partir da irradiação global medida por um piranômetro..... | 34 |
| 4. | MODELAGEM E FUNCIONAMENTO DE GERADORES FOTOVOLTAICOS | 36 |
| 4.1 | Células fotovoltaicas: histórico..... | 36 |
| 4.2 | Células de silício cristalino..... | 36 |
| 4.3 | Modelagem matemática de uma célula fotovoltaica..... | 38 |
| 4.4 | Modelagem do módulo fotovoltaico..... | 41 |
| 4.5 | Curva característica de uma célula fotovoltaica..... | 42 |
| 4.6 | Efeito da intensidade da radiação solar incidente sobre uma célula fotovoltaica..... | 44 |
| 4.7 | Efeitos da variação da temperatura sobre a curva característica $I - V$ | 45 |
| 5. | SEGUIDOR SOLAR, MECÂNICA, ELETRÔNICA E CUSTOS | 47 |
| 5.1 | Mecânica do seguidor solar com movimento único no eixo vertical..... | 47 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5.2 | Eletrônica..... | 51 |
| 5.3 | Custos..... | 60 |
| 6. | METODOLOGIA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS..... | 63 |
| 6.1 | Montagem do experimento..... | 63 |
| 6.1.1 | Observações sobre os instrumentos e sensores..... | 65 |
| 6.2 | Análise de incertezas do experimento..... | 66 |
| 6.2.1 | Incerteza da irradiância global..... | 67 |
| 6.2.2 | Incerteza da irradiância nas células de referência..... | 67 |
| 6.2.3 | Incerteza da corrente elétrica medida..... | 68 |
| 6.2.4 | Incerteza da medida da tensão..... | 68 |
| 6.2.5 | Incerteza da potência elétrica..... | 69 |
| 6.3 | Dados obtidos..... | 70 |
| 6.3.1 | Aumento de rendimento teórico..... | 70 |
| 6.3.2 | Dados experimentais..... | 73 |
| 6.3.3 | Curvas de irradiância e radiação global..... | 73 |
| 6.3.4 | Curvas de potência elétrica..... | 78 |
| 6.3.5 | Análise de energia gerada por períodos horários..... | 80 |
| 6.3.6 | Análise de um dia desfavorável..... | 82 |
| 6.3.7 | Irradiância anual (Porto Alegre): comparação de ganho energético de superfícies com seguimento azimutal em relação à fixa..... | 84 |
| 6.3.8 | Irradiância anual (diversas cidades): comparação de ganho energético de superfícies com seguimento azimutal em relação à fixa..... | 85 |
| 6.3.9 | Custo da energia elétrica gerada com e sem seguidor solar (exemplo)..... | 88 |
| 7. | CONCLUSÕES..... | 90 |
| | Referência Bibliográficas..... | 92 |
| | APÊNDICE I..... | 96 |
| | APÊNDICE II..... | 119 |

Lista de Símbolos

| | | |
|--------------|--|----------------------|
| $C1$ | Parâmetro de função..... | [-] |
| $C2$ | Parâmetro de função..... | [-] |
| D | Diâmetro da polia maior..... | [m] |
| De | Diâmetro da polia..... | [m] |
| Dm | Diâmetro médio da polia..... | [m] |
| Dm_1 | Diâmetro médio da polia 1..... | [m] |
| Dm_2 | Diâmetro médio da polia 2..... | [m] |
| dn | Dia do ano..... | [-] |
| e | Carga do elétron..... | [C] |
| E | Tensão elétrica..... | [V] |
| E_o | Fator de correção de excentricidade da órbita terrestre..... | [-] |
| E_t | Equação do tempo..... | [min] |
| $F_{1...}$ | Coeficientes do modelo Perez ($F_1, F_2, F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{21}, F_{22}, F_{23}$)..... | [-] |
| G | Irradiância global total..... | [Wm ⁻²] |
| G_b | Irradiância direta..... | [Wm ⁻²] |
| G_d | Irradiância difusa..... | [Wm ⁻²] |
| G_{fixa} | Irradiância medida pela célula de referência fixa..... | [Wm ⁻²] |
| $G_{móvel}$ | Irradiância medida pela célula de referência móvel..... | [Wm ⁻²] |
| G_r | Irradiância de referência..... | [Wm ⁻²] |
| h | Altura da correia..... | [m] |
| H | Irradiação global diária..... | [Whm ⁻²] |
| H_d | Irradiação difusa diária..... | [Whm ⁻²] |
| H_n | Parâmetro de função..... | [-] |
| H_o | Irradiação extraterrestre diária..... | [Whm ⁻²] |
| H_{o-azim} | Irradiação extraterrestre diária seguidor azimutal..... | [Whm ⁻²] |
| H_{o-dois} | Irradiação extraterrestre diária seguidor com dois eixos..... | [Whm ⁻²] |
| H_{o-fixa} | Irradiação extraterrestre diária conjunto fixo..... | [Whm ⁻²] |
| \bar{H} | Irradiação global diária em média mensal..... | [Whm ⁻²] |
| \bar{H}_d | Irradiação difusa diária em média mensal..... | [Whm ⁻²] |
| \bar{H}_o | Irradiação extraterrestre diária em média mensal..... | [Whm ⁻²] |
| i | Índice de relação entre polias..... | [-] |

| | | |
|----------------|---|---------------------|
| I | Irradiação global horária..... | $[\text{Whm}^{-2}]$ |
| I_a | Corrente elétrica..... | [A] |
| I_b | Irradiação direta horária..... | $[\text{Whm}^{-2}]$ |
| I_{bn} | Irradiação normal direta horária..... | $[\text{Whm}^{-2}]$ |
| I_{fx} | Corrente elétrica medida no shunt fixo..... | [A] |
| I_{fixa} | Corrente elétrica gerada pelo conjunto fotovoltaico fixo..... | [A] |
| I_{mov} | Corrente elétrica medida no shunt móvel..... | [A] |
| $I_{móvel}$ | Corrente elétrica gerada pelo conjunto fotovoltaico móvel..... | [A] |
| $I_{b\beta}$ | Irradiação direta horária na superfície inclinada..... | $[\text{Whm}^{-2}]$ |
| $I_{b\beta m}$ | Irradiação direta horária na superfície inclinada e em movimento..... | $[\text{Whm}^{-2}]$ |
| I_{cn} | Corrente da célula índice n..... | [A] |
| I_C | Corrente da célula..... | [A] |
| I_d | Irradiação difusa horária..... | $[\text{Whm}^{-2}]$ |
| $I_{d\beta}$ | Irradiação difusa horária na superfície inclinada..... | $[\text{Whm}^{-2}]$ |
| I_D | Corrente do diodo..... | [A] |
| I_L | Corrente fotogerada..... | [A] |
| I_M | Corrente de máxima potência..... | [A] |
| I_o | Irradiação extraterrestre horária..... | $[\text{Whm}^{-2}]$ |
| I_O | Corrente de saturação reversa..... | [A] |
| I_{on} | Irradiação normal extraterrestre horária..... | $[\text{Whm}^{-2}]$ |
| $I_{o\beta}$ | Irradiação extraterrestre horária na superfície inclinada..... | $[\text{Whm}^{-2}]$ |
| I_P | Corrente de fuga..... | [A] |
| $I_{r\beta}$ | Irradiação refletida horária na superfície inclinada..... | $[\text{Whm}^{-2}]$ |
| I_{sc} | Constante solar..... | $[\text{Wm}^{-2}]$ |
| $I_{série}$ | Corrente série módulo..... | [A] |
| I_{SC} | Corrente de curto circuito..... | [A] |
| I_{SCr} | Corrente de curto circuito de referência..... | [A] |
| I_{soma} | Soma da corrente elétrica gerada pelo conjunto fixo e móvel..... | [A] |
| I_{β} | Irradiação global horária na superfície inclinada..... | $[\text{Whm}^{-2}]$ |
| $I_{\beta m}$ | Irradiação global horária na superfície inclinada e em movimento..... | $[\text{Whm}^{-2}]$ |
| k | Constante de Boltzman..... | [J/K] |
| k_d | Fração difusa horária..... | [-] |
| k_t | Índice de claridade horário..... | [-] |

| | | |
|-------------|--|-----------------|
| K_d | Fração difusa diária..... | [-] |
| K_t | Índice de claridade diário..... | [-] |
| \bar{K}_d | Fração difusa diária média mensal..... | [-] |
| \bar{K}_t | Índice de claridade diário médio mensal..... | [-] |
| L_{oc} | Longitude local..... | [grau] |
| L_{st} | Longitude padrão..... | [grau] |
| m | Fator de idealidade do diodo..... | [-] |
| m_a | Massa de ar..... | [-] |
| m_n | Parâmetro de função..... | [-] |
| n | Reta normal ao plano..... | [-] |
| N_1 | Número de rotações da polia 1..... | [rpm] |
| N_2 | Número de rotações da polia 2..... | [rpm] |
| N_d | Número de horas de luz solar..... | [h] |
| N_p | Número de células em paralelo..... | [-] |
| N_s | Número de células em série..... | [-] |
| p | Reta auxiliar..... | [-] |
| P_e | Limite entre eixos da máquina..... | [m] |
| P_M | Ponto de máxima potência | [W] |
| P_{fixa} | Potência instantânea conjunto fixo leitura com a incerteza..... | [W] |
| P_{fx} | Potência instantânea conjunto fixo..... | [W] |
| P_{mov} | Potência instantânea conjunto móvel..... | [W] |
| $P_{móvel}$ | Potência instantânea conjunto móvel leitura com a incerteza..... | [W] |
| P_{total} | Potência total..... | [W] |
| r | Reta auxiliar..... | [-] |
| r' | Reta auxiliar..... | [-] |
| R_b | Fator geométrico..... | [-] |
| R'_b | Fator geométrico para superfície em movimento..... | [-] |
| R_p | Resistência paralela..... | [Ω] |
| R_s | Resistência série..... | [Ω] |
| s | Reta auxiliar..... | [-] |
| T | Temperatura da célula (item 4.3)..... | [K] |
| T_c | Temperatura da célula (item 4.7)..... | [$^{\circ}$ C] |
| TO | Hora oficial..... | [h] |

| | | |
|----------------------|--|---------------------|
| TSV | Hora solar (tempo solar verdadeiro)..... | [h] |
| UA | Unidade astronômica (149.597.890 km)..... | [unidade] |
| V | Tensão nos terminais da célula..... | [V] |
| V_{cn} | Tensão da célula índice n..... | [V] |
| V_M | Tensão de máxima potência..... | [V] |
| V_{OC} | Tensão de circuito aberto..... | [V] |
| $V_{paralelo}$ | Tensão paralelo..... | [V] |
| $V_{série}$ | Tensão série..... | [V] |
| x | Altura efetiva da correia..... | [m] |
| Z | Zênite local..... | [-] |
| α | Ângulo de elevação solar..... | [grau] |
| α_t | Coeficiente térmico relacionado a corrente de curto-circuito..... | [A/°C] |
| β | Ângulo de inclinação..... | [grau] |
| β_t | Coeficiente térmico relacionado a tensão de circuito aberto..... | [V/°C] |
| Γ | Ângulo do dia..... | [grau] |
| Δ | Brilho..... | [-] |
| ΔI_{shfixo} | Incerteza da medição da corrente elétrica conjunto fixo..... | [A] |
| $\Delta I_{shmóvel}$ | Incerteza da medição da corrente elétrica conjunto móvel..... | [A] |
| ΔI_{soma} | Incerteza da soma das correntes medidas..... | [A] |
| ΔP_{fixa} | Incerteza da potência instantânea do conjunto fixo..... | [W] |
| $\Delta P_{móvel}$ | Incerteza da potência instantânea do conjunto móvel..... | [W] |
| ΔP_{total} | Incerteza da soma das potências instantâneas..... | [W] |
| ΔR_{global} | Incerteza da medição da radiação global horizontal..... | [Wm ⁻²] |
| ΔR_{cel} | Incerteza da medição da radiação das células de referência fixa e móvel..... | [Wm ⁻²] |
| ΔV_{volt} | Incerteza da medição tensão elétrica..... | [V] |
| ε | Parâmetro de claridade..... | [-] |
| γ | Ângulo de azimute da superfície..... | [grau] |
| γ_s | Ângulo de azimute solar..... | [grau] |
| δ | Ângulo de declinação..... | [grau] |
| θ' | Ângulo de incidência..... | [grau] |
| θ_s | Ângulo de incidência direta..... | [grau] |
| θ_z | Ângulo de zênite..... | [grau] |
| ρ | Albedo..... | [-] |

| | | |
|-------------|--|--------|
| ϕ | Latitude..... | [grau] |
| ω | Ângulo horário..... | [grau] |
| ω_c | Parâmetro de função..... | [grau] |
| ω_s | Ângulo do nascer do Sol..... | [grau] |
| ω'_s | Ângulo do nascer do Sol para superfície inclinada..... | [grau] |
| ω_1 | Ângulo horário 1..... | [rad] |
| ω_2 | Ângulo horário 2..... | [rad] |

Lista de Figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Seguidor com eixo horizontal leste-oeste..... | 5 |
| 2.2 | Sistema de seguimento solar com eixo horizontal móvel..... | 6 |
| 2.3 | Seguidor com eixo horizontal sul-norte..... | 7 |
| 2.4 | Seguidor polar..... | 8 |
| 2.5 | Equipamentos de seguimento, montagem polar..... | 10 |
| 2.6 | Seguidor eixo vertical móvel..... | 11 |
| 2.7 | Seguidores azimutais..... | 12 |
| 2.8 | Seguidor solar, eixo vertical e horizontal móvel..... | 13 |
| 2.9 | Seguimento nos dois eixos aplicados em: heliostato (a), coletor solar (b) e módulos fotovoltaicos (c)..... | 14 |
| 3.1 | Excentricidade da órbita terrestre..... | 21 |
| 3.2 | Ângulos de incidência direta, inclinação do painel e azimute terrestre..... | 25 |
| 4.1 | Junção P-N..... | 37 |
| 4.2 | Célula fotovoltaica..... | 38 |
| 4.3 | Circuito simplificado (célula fotovoltaica)..... | 38 |
| 4.4 | Circuito completo (célula fotovoltaica)..... | 40 |
| 4.5 | Curvas características de um diodo no escuro (a), iluminado (b) e curva rebatida sobre o eixo das abscissas (c)..... | 42 |
| 4.6 | Gráfico de uma célula fotovoltaica e associação série de várias células..... | 43 |
| 4.7 | Curva de um módulo, pontos: V_{OC} , I_{SC} , V_M , I_M e P_M ; curva de potência..... | 44 |
| 4.8 | Efeito da variação da intensidade de radiação sobre a célula fotovoltaica..... | 45 |
| 4.9 | Célula fotovoltaica com radiação constante e submetida à variação de temperatura.. | 46 |
| 5.1 | Sistema de polias (a), correia tipo V (b), polias com correia tipo V (c), elementos da correia tipo V em um sistema de polias (d)..... | 48 |
| 5.2 | Polias, braço horizontal e motor impulsor..... | 49 |
| 5.3 | Seqüência de montagem da máquina de seguimento solar..... | 50 |
| 5.4 | Detalhes do motor, polias e correia..... | 50 |
| 5.5 | Eixo horizontal e suportes para módulos fotovoltaicos, já fixados no eixo vertical... | 51 |
| 5.6 | Sensor magnético e óptico..... | 52 |
| 5.7 | Sensores magnéticos (a) e conjunto ótico (b)..... | 53 |
| 5.8 | Haste de sombreamento e fototransistor..... | 54 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.9 | Motorreductor BOSCH e curva para um modelo da família CHP..... | 55 |
| 5.10 | Fluxograma do programa de controle..... | 56 |
| 5.11 | Seguidor solar com módulos e sensores instalados..... | 57 |
| 5.12 | Seguidor solar com módulos instalados..... | 58 |
| 5.13 | Detalhe dos módulos e conjunto ótico..... | 58 |
| 5.14 | Conjunto de módulos móvel e fixo..... | 59 |
| 5.15 | Placa de controle do sistema e carga com conjunto de lâmpadas..... | 59 |
| 6.1 | Detalhes da montagem do experimento..... | 64 |
| 6.2 | Curvas teóricas: seguimento solar com dois eixos, azimutal e fixa..... | 72 |
| 6.3 | Comparação entre radiação global, irradiância conjunto móvel e fixo dia 27/02/08.. | 74 |
| 6.4 | Comparação entre radiação global, irradiância conjunto móvel e fixo dia 04/03/08.. | 74 |
| 6.5 | Comparação entre radiação global, irradiância conjunto móvel e fixo dia 07/03/08.. | 75 |
| 6.6 | Curvas medidas (global e fixa) e teórica (Orgill)..... | 76 |
| 6.7 | Curvas medidas (global e fixa) e teórica (Perez)..... | 77 |
| 6.8 | Comparação entre as irradiâncias obtidas com célula de referência móvel e teórica pelo modelo de Orgill..... | 77 |
| 6.9 | Comparação entre as irradiâncias obtidas com célula de referência móvel e teórica pelo modelo de Perez..... | 78 |
| 6.10 | Gráfico das curvas de tensão da bateria e potência dos conjuntos..... | 79 |
| 6.11 | Potência e tensão no período do amanhecer até as 11:00h (-15°)..... | 81 |
| 6.12 | Potência e tensão no período central 11:00h até as 13:00h (-15° a 15°)..... | 81 |
| 6.13 | Potência e tensão no período das 13:00h (15°) até o pôr-do-sol..... | 82 |
| 6.14 | Comparação entre radiação global, irradiância conjunto móvel e fixo dia 28/02/08.. | 83 |
| 6.15 | Gráfico das curvas de tensão da bateria, e potência dos conjuntos..... | 83 |

Lista de tabelas

| | | |
|------|---|----|
| 3.1 | Albedo de algumas superfícies..... | 30 |
| 3.2 | Coeficientes do modelo Perez..... | 33 |
| 5.1 | Componentes e valores..... | 60 |
| 5.2 | Valores de seguidor solar até 4m ² de módulos..... | 61 |
| 5.3 | Custos de seis manutenções preventivas..... | 61 |
| 6.1 | Características de equipamentos e sensores..... | 63 |
| 6.2 | Características nominais do módulo KC85T..... | 65 |
| 6.3 | Características de cada shunt utilizado..... | 66 |
| 6.4 | Energia diária gerada pelo conjunto móvel e fixo (07/03/2008)..... | 79 |
| 6.5 | Geração com quatro módulos fotovoltaicos em cada conjunto..... | 80 |
| 6.6 | Ganho energético mensal para diferentes inclinações da superfície (móvel) em relação à fixa (Porto Alegre)..... | 84 |
| 6.7 | Ganho energético mensal para diferentes inclinações da superfície (móvel) em relação à fixa (Aracaju)..... | 85 |
| 6.8 | Ganho energético mensal para diferentes inclinações da superfície (móvel) em relação à fixa (São Paulo)..... | 86 |
| 6.9 | Ganho energético mensal para diferentes inclinações da superfície (móvel) em relação à fixa (Macapá)..... | 86 |
| 6.10 | Ganho energético mensal para diferentes inclinações da superfície (móvel) em relação à fixa (Manaus)..... | 87 |
| 6.11 | Ganho energético mensal para diferentes inclinações da superfície (móvel) em relação à fixa (Recife)..... | 87 |
| 6.12 | Custo dos componentes de um sistema autônomo e custo total cada sistema..... | 88 |

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O Sol é uma fonte de energia limpa. Este recurso energético vem sendo utilizado cada vez mais intensamente pela humanidade através de métodos de transformação da energia solar, tais como: coletor solar, secadores, estufas, fornos para altas temperaturas (com o uso de concentradores óticos), conversão fotovoltaica, bombeamento e dessalinização de água, refrigeração e inúmeras aplicações que são desenvolvidas por diversos pesquisadores.

Instalações de sistemas fotovoltaicos, autônomos e principalmente os conectados à rede de energia elétrica têm crescido em todos os continentes. A Europa tem-se destacado na implantação de grandes centrais de geração fotovoltaica [Castro, 2007].

A instalação de sistemas de seguimento solar em grandes centrais de geração fotovoltaica conectadas à rede elétrica vem crescendo, pois o aumento de produção energética destas em relação aos sistemas fixos é significativo, como por exemplo, as centrais de Serpa em Portugal [Maso, 2007], Almaraz na Espanha (informativo Mecasolar, 2008), Nellis nos Estados Unidos da América, Monte Alto na Espanha, Erlasse na Alemanha e tantas outras (informativo Wikipedia, 2008). Sistemas de seguimento solar também estão sendo usados em grande número de instalações autônomas, pois a eletrônica de controle e mecânica usada nestes equipamentos teve seus custos reduzidos devido a novas tecnologias, que dispensam manutenções caras e altamente especializadas.

Em sistemas fotovoltaicos, a eficiência dos mesmos fica limitada entre outras coisas, às especificações dos fabricantes das células fotovoltaicas, dos módulos, componentes de controle (reguladores, conversores, etc.) e acumuladores associados aos mesmos. Diversos pesquisadores se preocupam em aumentar o rendimento destes sistemas, com estudos diversos que abrangem: associação de células fotovoltaicas (série e ou paralela), associação de módulos fotovoltaicos [Hecktheuer, 2001], efeito de sombreamento sobre módulos e células, inclinação de painéis em diferentes latitudes e períodos do ano [Kacira et al., 2004; Shayani, 2006], seguimento do Sol para maior incidência direta dos raios solares sobre os painéis fotovoltaicos [Poulek et al., 1998; Oliveira, 2007; Karimov et al., 2005], concentradores óticos que aumentam a quantidade de energia radiante sobre uma área determinada de painéis [Poulek et al., 2000], e outros inúmeros estudos que são desenvolvidos em centros e laboratórios de pesquisas.

Pelo grande uso de sistemas fotovoltaicos com seguimento solar (Europa, Ásia e América do Norte), justifica-se um estudo para verificar o acréscimo de produção energética de

um sistema com seguidor em relação a um fixo. Neste trabalho, a ênfase é dada a um sistema de seguimento solar azimutal, ou seja, seguimento através de movimento único no eixo vertical (correção do azimute da superfície), sendo a inclinação fixa e determinada pela latitude local. O sistema implementado para comparação é autônomo.

1.2 Objetivos da dissertação

A presente dissertação tem os seguintes objetivos:

- Apresentar uma metodologia para verificar o aumento da produção energética de um sistema fotovoltaico autônomo com seguidor solar (azimutal) em relação a um sistema fixo.
- Verificar em quais períodos do dia há uma maior produção energética do sistema com seguimento solar azimutal.
- Determinar um conjunto de equações que aplicadas às medições da radiação global horizontal, gerem as curvas de irradiância sobre uma superfície inclinada fixa ou em movimento e comparar se há concordância com as curvas de irradiância produzidas a partir das medidas realizadas por células de referência inclinada fixa e móvel.
- Descrever o seguidor solar azimutal montado no Laboratório de Energia Solar da UFRGS para este experimento. Mostrar que através de uma mecânica simples e um sistema de controle eletrônico confiável (microcontrolado), é possível montar este tipo de equipamento com custos razoáveis.
- Examinar o funcionamento do equipamento com diferentes índices de radiação solar direta.
- Analisar se o uso de um seguidor solar azimutal traz vantagens, se isto ocorrer, responder em quais tipos de instalações (autônomas ou conectadas a rede elétrica).
- Verificar por métodos computacionais, se o seguimento solar azimutal é viável em diferentes latitudes.

1.3 Escopos da dissertação

Para o desenvolvimento desta dissertação a mesma foi dividida em sete capítulos, descritos como segue:

No capítulo 1, é descrita a motivação para um trabalho que analisa o rendimento de um sistema fotovoltaico com seguimento solar em relação a um fixo, os objetivos a serem alcançados e escopos da dissertação.

No capítulo 2, a geometria e o conjunto de equações usadas nos tipos mais usuais de seguimento solar são analisados. Também são comentados os principais tipos de sensores utilizados para o posicionamento de um seguidor solar.

No capítulo 3, são revisados os principais conceitos de energia solar e as principais equações usadas nesta dissertação.

No capítulo 4, é feita uma revisão de tópicos essenciais de energia fotovoltaica, tais como, histórico, células, módulos, cálculos de modelos, tipos de associações (série e paralelo) e parâmetros que influenciam a eficiência dos equipamentos de conversão de luz em energia elétrica.

No capítulo 5, é descrito o seguidor solar azimutal utilizado neste trabalho. São detalhadas as partes mais importantes da máquina, tais como, sua mecânica, circuito eletrônico, sensores utilizados e fluxograma do programa de controle. Também são descritos os valores dos componentes do equipamento de seguimento e o custo final do mesmo.

No capítulo 6, é relatada a metodologia para as diversas medições e são geradas as curvas para os valores obtidos (irradiância sobre a superfície fixa e móvel, radiação global, tensão do sistema, energia gerada). As curvas para superfícies inclinadas, fixa e móvel (a partir da radiação global horizontal medida) são geradas com um conjunto de equações. É verificado se existe concordância entre as curvas geradas por medições e por equações.

Também são mostradas tabelas obtidas por simulações computacionais, para diferentes cidades do Brasil, onde é verificado o ganho energético mensal com o uso de um seguidor solar, com diferentes inclinações em relação a um sistema fixo. Uma estimativa de custo de geração de energia para um sistema fixo e móvel é realizado através de um exemplo para Porto Alegre.

No capítulo 7, são apresentadas as conclusões e sugestões finais.

Finalmente, no Apêndice I estão descritos tópicos diversos de radiação solar. E no Apêndice II, características do microcontrolador 8051, o esquema eletrônico do circuito de controle e foto da placa eletrônica.

2. SEGUIDOR SOLAR

2.1 Princípio

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 com 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; mas na maioria das aplicações de sistemas ativos de seguimento, arranjos de sensores ópticos são o suficiente para determinar a posição solar através de sistemas eletrônicos.

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, que muda o ponto de equilíbrio do sistema. Também 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 et al., 1991.

2.2.1 – Movimento sobre eixo horizontal (orientação 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, e após, usado em aplicações térmicas. Também pode ser usado em conjunto de painéis fotovoltaicos, onde é minimizado o ângulo de incidência. Na Figura 2.1, observa-se os principais ângulos que envolvem este modelo, onde r é a reta auxiliar paralela ao plano local, n é

a normal ao plano, s reta que vai da Terra ao centro do Sol, Z é o zênite local, β o ângulo de inclinação do painel, α o ângulo de altitude solar, θ_s o ângulo de incidência direta, θ_z o ângulo de zênite, γ_s o ângulo de azimute solar e γ o ângulo de azimute da superfície.

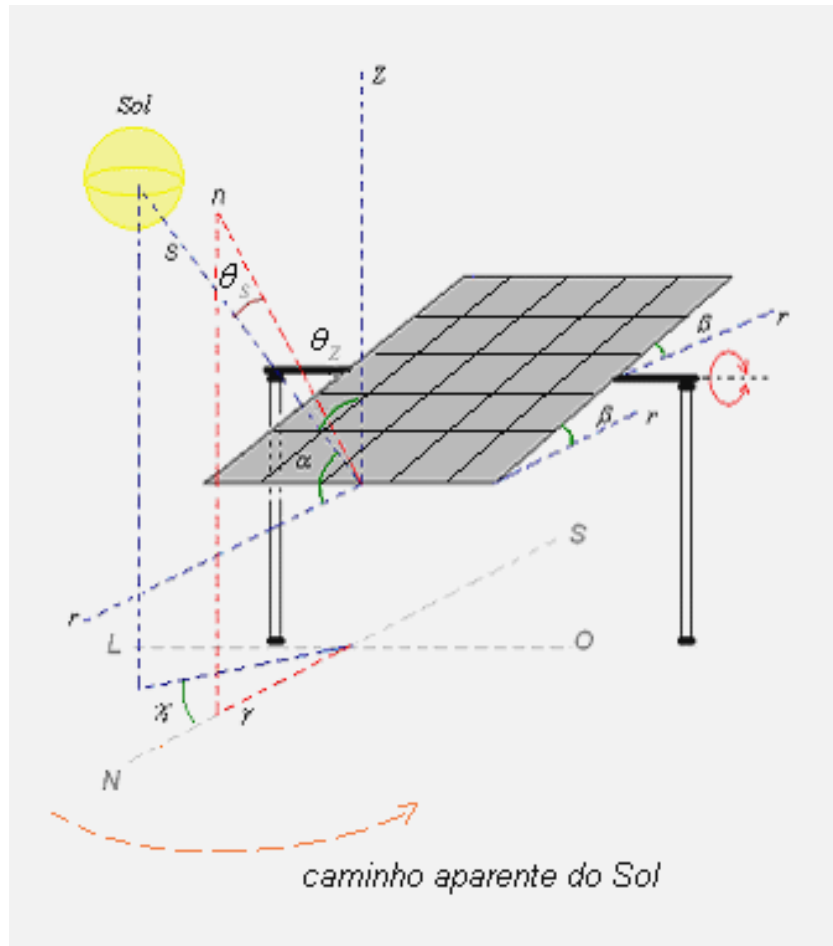


Figura 2.1 Seguidor com eixo horizontal leste-oeste

A equação usada para determinar o ângulo de incidência direta é

$$\cos\theta_s = (1 - \cos^2\delta \sin^2\omega)^{1/2} \quad (2.1)$$

onde δ é o ângulo de declividade terrestre e ω o ângulo horário (definidos no Apêndice I). Para calcular a inclinação do painel, usa-se

$$\tan\beta = \tan\theta_z |\cos\gamma_s| \quad (2.2)$$

O ângulo de azimute solar irá variar com a trajetória aparente do Sol durante o dia, mas o azimute da superfície estará 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. Seu funcionamento baseia-se em seguir a trajetória aparente do Sol em cada dia, começando em sua posição de nascimento. No momento que o Sol atingir o ponto de maior altitude solar, se tem o menor valor de inclinação do painel. Depois o painel irá começar a voltar à posição inicial de amanhecer (que é igual a do entardecer).

Na Figura 2.2 observa-se a aplicação do sistema de eixo horizontal móvel na Central Solar de Serpa (Portugal). Foram instalados 52.000 módulos fotovoltaicos, gerando 20 GWh por ano de energia elétrica.



Figura 2.2 Sistema de seguimento solar com eixo horizontal móvel. [fonte: pt.wikipedia.org].

2.2.2 Movimento sobre eixo horizontal (orientação sul-norte)

Montagem robusta e simples, com aplicações semelhantes ao item 2.2.1, apresenta um bom rendimento de conversão. A Figura 2.3 esclarece seu funcionamento e os principais ângulos envolvidos (os ângulos já foram relacionados anteriormente).

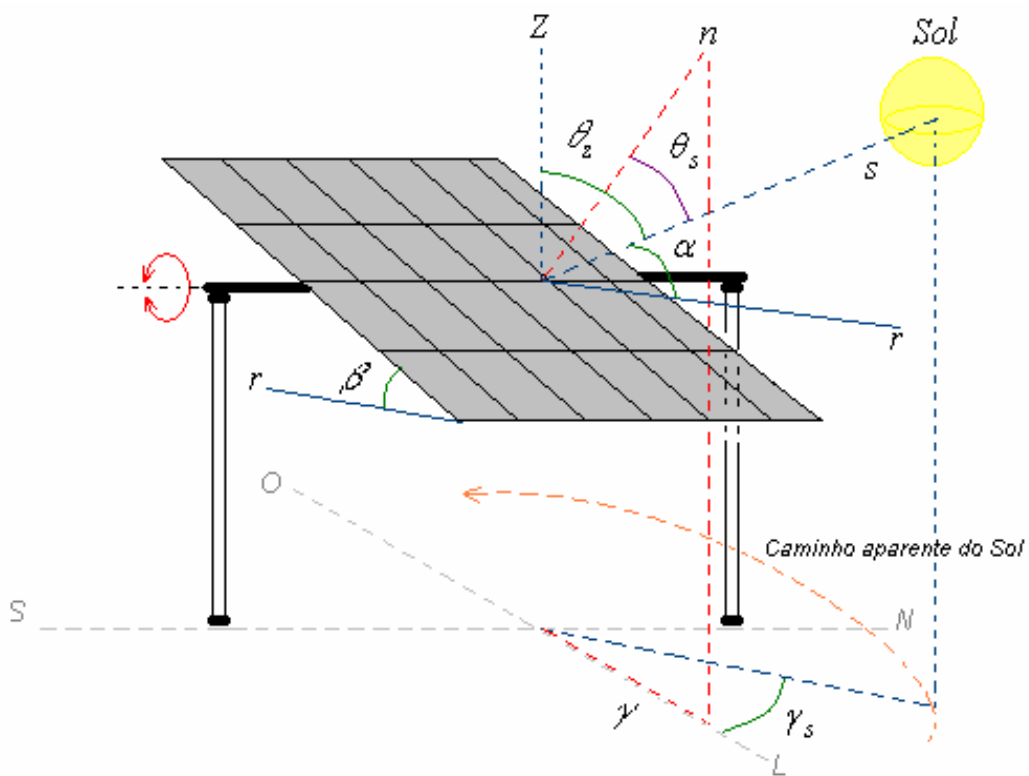


Figura 2.3 Seguidor com eixo horizontal sul-norte

A equação para determinação do ângulo de incidência direta é

$$\cos \theta_s = (\cos^2 \theta_z + \cos^2 \delta \sin^2 \omega)^{1/2} \quad (2.3)$$

onde δ é o ângulo de declividade terrestre, ω o ângulo horário e θ_z ângulo de zênite. Para a determinação do ângulo de inclinação do painel usa-se

$$\tan \beta = \tan \theta_z |\cos(\gamma - \gamma_s)| \quad (2.4)$$

O valor do 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° . Observe que azimute de superfície será -90° , até o Sol cruzar a posição de maior elevação, que é o momento que o caminho aparente solar muda do leste para o oeste, quando seu valor passa para 90° , isto vale para os dois hemisférios.

2.2.3 Seguidor polar (um eixo móvel norte-sul)

O seguidor polar tem um plano girando sobre um eixo norte-sul paralelo ao eixo terrestre, mais precisamente é um eixo perpendicular a eclíptica (plano imaginário que descreve o caminho aparente do Sol) nos equinócios. Montagem simples e bastante eficiente usa um impulsor elétrico que em muitas montagens é alimentado por um pequeno painel anexo ao conjunto que também serve de sensor para o seguimento solar [Poulek et al., 1998]. Na Figura 2.4 apresentam-se detalhes deste modelo.

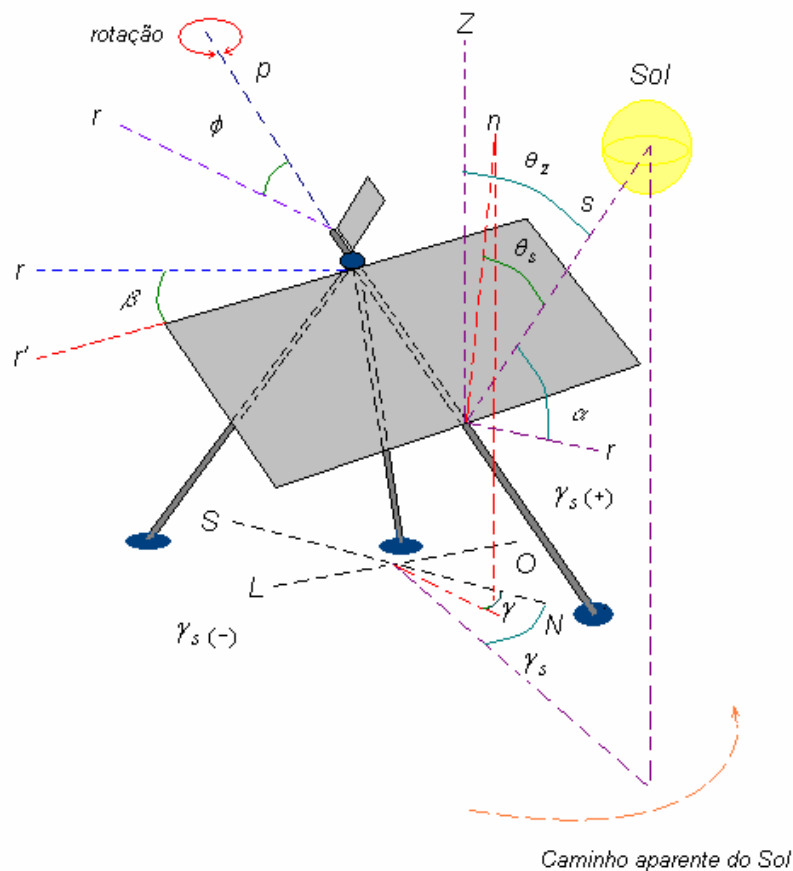


Figura 2.4 Seguidor polar

Na Figura 2.4, r' é uma reta auxiliar que está contida no plano do painel, r são retas auxiliares paralelas ao plano local, p é uma reta que é extensão do eixo de sustentação do conjunto que é paralela ao eixo polar da Terra, ϕ identifica a latitude local e nota-se também o sinal para o azimute solar conforme a região onde a reta s está projetada.

As equações usadas neste tipo de montagem são descritas a seguir. Para o cálculo do ângulo de incidência direta θ_s , usa-se

$$\cos \theta_s = \cos \delta \quad (2.5)$$

onde δ , é a declividade terrestre. O ângulo de inclinação do painel β , será dado por

$$\tan \beta = \frac{\tan \phi}{\cos \gamma} \quad (2.6)$$

onde ϕ é a latitude local. O ângulo de azimute da superfície γ usa uma equação com um conjunto de parâmetros a determinar:

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{\text{sen} \theta_z \text{sen} \gamma_s}{\cos \theta' \text{sen} \phi} + 180 C1 C2 \quad (2.7)$$

onde,

$$\cos \theta' = \cos \theta_z \cos \phi + \text{sen} \theta_z \text{sen} \phi \quad (2.8)$$

os parâmetros $C1$ e $C2$ são determinados por:

$$C1 = \begin{cases} 0 & \text{se } \tan^{-1} \left(\frac{\text{sen} \theta_z \text{sen} \gamma_s}{\cos \theta' \text{sen} \phi} \right) + \gamma_s = 0 \\ 1 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.9)$$

$$C2 = \begin{cases} 1 & \text{se } \gamma_s \geq 0 \\ 0 & \text{se } \gamma_s < 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

Alguns equipamentos de seguimento solar com montagem polar podem ser observados na Figura 2.5.

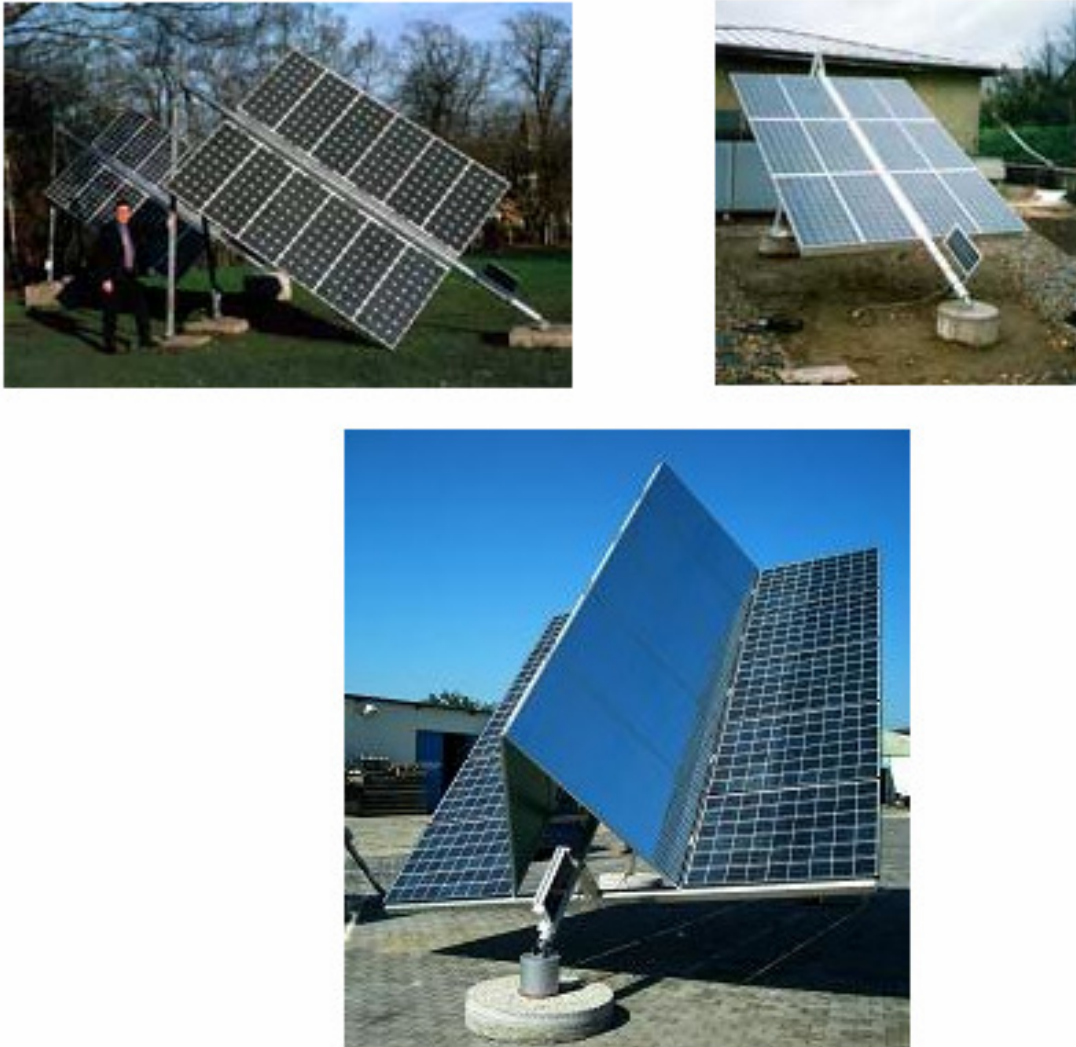


Figura 2.5 Equipamentos de seguimento, montagem polar. [fonte: Poulek Solar].

2.2.4 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, 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, é uma opção simples para este tipo de dispositivo. Na Figura 2.6 observa-se o princípio de funcionamento e a geometria dos ângulos importantes deste seguidor solar.

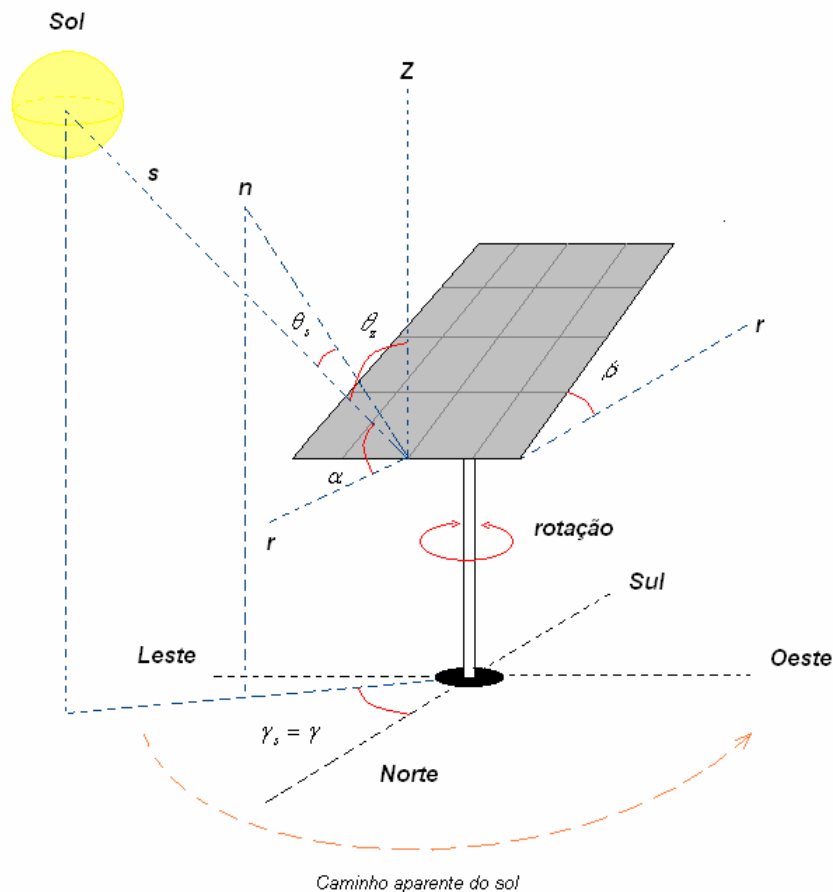


Figura 2.6 Seguidor eixo vertical móvel.

Neste tipo de seguidor o movimento do eixo vertical faz 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 por:

$$\cos \theta_s = \cos \theta_z \cos \beta + \text{sen} \theta_z \text{sen} \beta \quad (2.11)$$

onde θ_z é o ângulo de zênite e β o ângulo de inclinação do conjunto de painéis;

$$\beta = cte. \quad (2.12)$$

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].

Outra equação simples é a (2.13), dos azimutes da superfície e solar, já descritos.

$$\gamma = \gamma_s \quad (2.13)$$

Na Figura 2.7 aparecem dois modelos de seguidor azimutal (movimento no eixo vertical). O modelo que tem os painéis na posição vertical, Figura 2.7 (a) é usado para ensaios de alimentação de satélites ou em regiões próximas aos pólos.



(a) Instalado em campo



(b) Esquema de acionamento

Figura 2.7 Seguidores azimutais [fonte: Poulek Solar e Epsea].

2.2.5 Seguidor com dois eixos móveis (vertical e horizontal)

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 2.8.

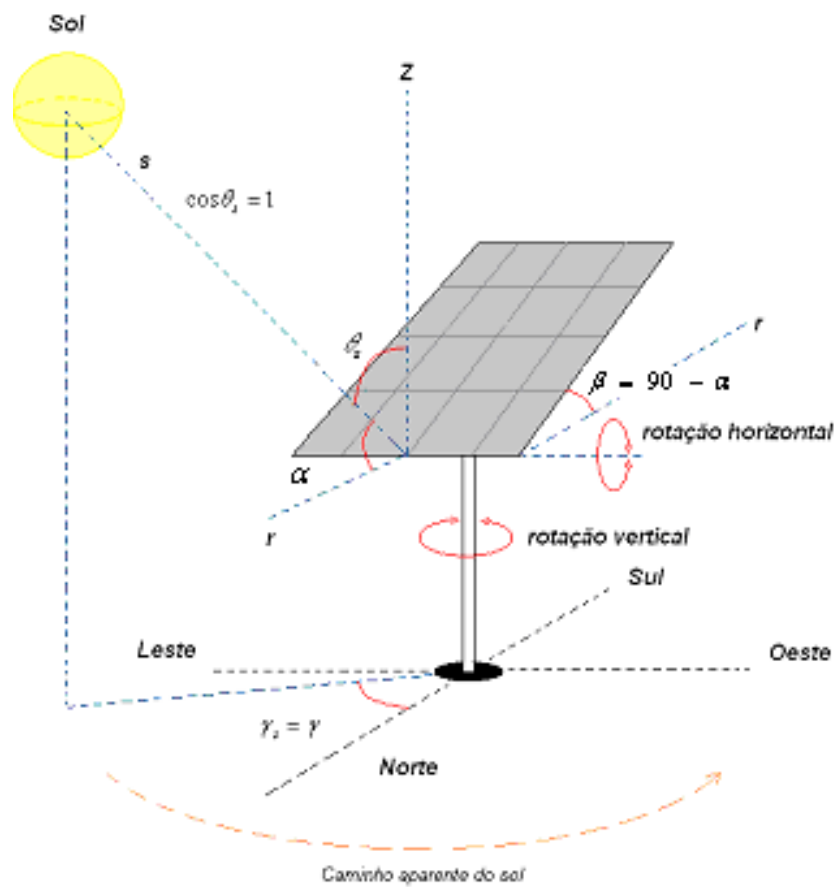


Figura 2.8 Seguidor solar, eixo vertical e horizontal móvel

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 que θ_s seja igual a zero, ou seja:

$$\cos \theta_s = 1 \quad (2.14)$$

também devido ao movimento do eixo horizontal, tem-se a correção constante da inclinação do painel em relação ao Sol, assim:

$$\beta = 90 - \alpha \quad (2.15)$$

e com o movimento do eixo vertical, tem-se a correção do azimute, onde:

$$\gamma_s = \gamma \quad (2.16)$$

Na Figura 2.9 apresentam-se montagens com seguimento nos dois eixos com aplicação em heliostatos, coletor solar e painéis fotovoltaicos.

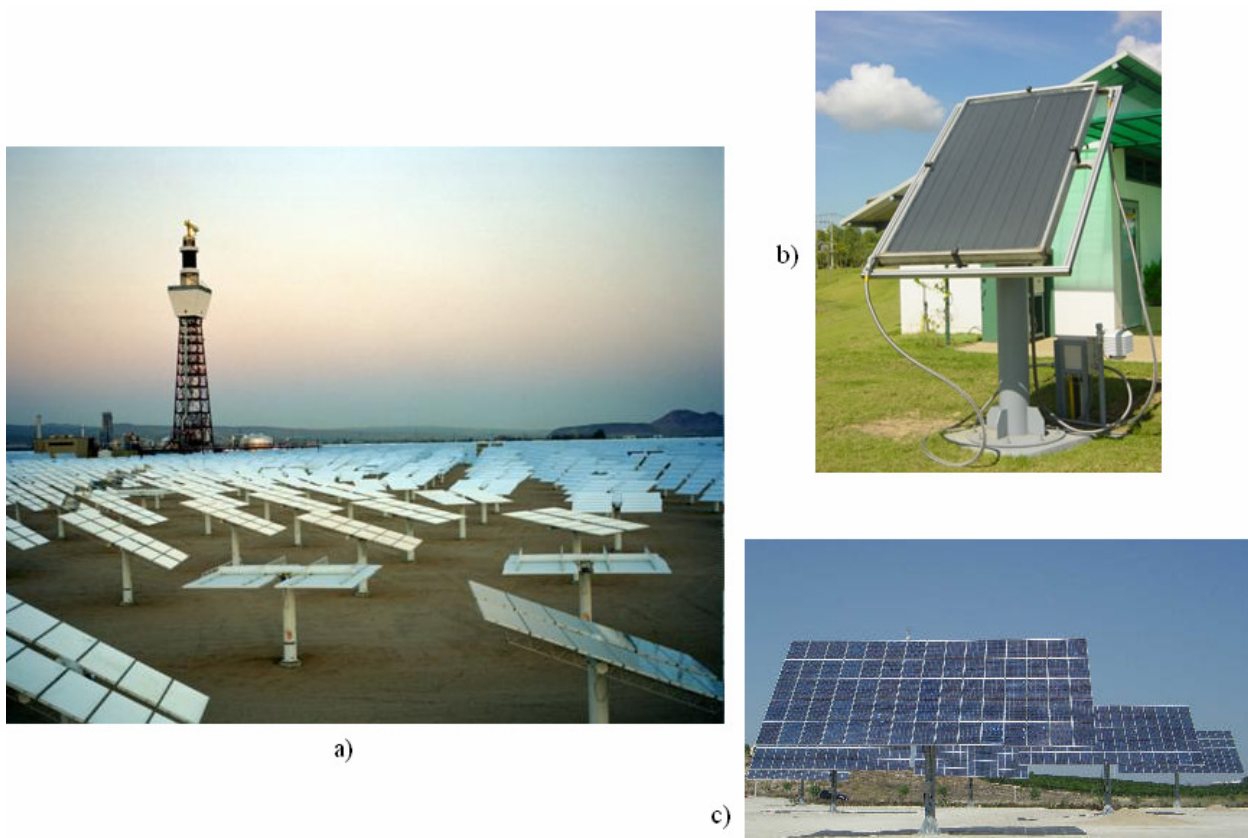


Figura 2.9 Seguimento nos dois eixos aplicados em: heliostato (a), coletor solar (b) e módulos fotovoltaicos (c). [fonte: Inforse-2007]

2.3 Métodos de posicionamento de equipamentos de seguimento solar

A maior parte dos sistemas de seguimento solar ativo é controlada por circuitos eletrônicos que através de lógica digital e sensores óticos, determinam o correto posicionamento

do Sol, fazendo o conjunto de módulos ficarem perpendicular aos raios do Sol. Com a grande redução de custos de microprocessadores e microcontroladores e a confiabilidade destes, os circuitos de controle de seguimento solar tiveram uma redução em seus valores, viabilizando sistemas simples e confiáveis.

Sistemas sofisticados usam processadores que executam cálculos precisos de posição azimutal e de elevação solar para qualquer dia do ano, horário solar real e localização geográfica (latitude, longitude e altitude), acionando motores elétricos de precisão como os de passo (*step motor*) ou motores com circuitos realimentados, para uma frenagem precisa. Estes modelos são usados em sistemas que requerem alta precisão como em concentradores de dois eixos. Em sistemas de grande porte conjuntos hidráulicos são acionados e controlados por processadores eletrônicos.

Na maioria das aplicações de sistemas de seguimento solar, o posicionamento do conjunto de conversão de energia é baseado em sensores óticos como fototransistor, fotodiodo, LDR (resistores dependentes 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 determina que estejam voltados para o Sol, caso contrário, o sistema de controle irá 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. Quando houver o movimento do eixo de elevação do conjunto, também é usado o mesmo tipo de controle ótico. Alguns equipamentos usam pequenos painéis fotovoltaicos com duas faces para alimentar diretamente o motor de acionamento do conjunto (item 2.2.3). 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.

O sistema que foi adotado para este trabalho é baseado no movimento aparente do Sol, ou seja, leste-oeste. Usa-se uma haste de sombreamento sobre um único sensor que fica no lado oeste do conjunto, sempre que houver luz sobre o sensor o controlador aciona o motor de movimentação na direção oeste até que haja sombra sobre o sensor, ou seja, os painéis estarão voltados 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 em cada projeto.

2.4 Revisão bibliográfica

Vários pesquisadores desenvolvem equipamentos de seguimento solar, ou utilizam os mesmos em pesquisas. Estes dispositivos são empregados em transformação térmica, conversão fotovoltaica, em concentradores de energia ou em aparelhos de medição (radiômetros). O objetivo do equipamento de seguimento solar é manter a superfície de conversão, instalada no mesmo, sempre voltada para o Sol.

Neste item são descritos alguns trabalhos, na área de seguimento solar, que descrevem equipamentos usados em conversão fotovoltaica e em concentradores de radiação solar. As principais características de funcionamento e os resultados obtidos são descritos sucintamente.

Poulek, et al., 1998. Os autores descrevem um seguidor solar onde o eixo motor, alimentado por corrente contínua, é acionado diretamente por um arranjo de células fotovoltaicas (formando uma célula com duas faces). As células são instaladas com um ângulo de inclinação de 20° em relação à reta normal ao conjunto de painéis fotovoltaicos. 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.

Poulek, et al., 2000. Os pesquisadores desenvolveram um seguidor solar de montagem muito simples. Pode 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.

O ganho alcançado pelo sistema é de até 95% do obtido por um seguidor ideal.

Karimov, et al., 2005. Os autores apresentam um sistema de seguimento solar, que dispensa o uso de circuito eletrônico de controle e baterias. A alimentação do motor de movimentação do seguidor 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 e com um ângulo entre módulos 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 $\pm 10^\circ$.

Kacira, et al., 2004. Trabalho que analisa o melhor ângulo de inclinação e orientação de um sistema fixo em Sanliurfa, Turquia. 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, 2007. Dissertação de mestrado, onde 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. Usa uma mecânica baseada em caixa de redução, contrapeso e um carretel que enrola e desenrola um cabo de aço que faz a movimentação dos painéis fotovoltaicos.

São usados dois sensores LDR (resistor dependente de luz) e uma parede entre os mesmos, para que ocorra sombra sobre um deles sempre que não estiverem alinhados (em frente ao Sol). O circuito de controle acionará o motor para o posicionar o conjunto fotovoltaico na posição ideal.

O ângulo máximo de rastreo é de 140° e a precisão é de seguimento para dias de céu limpo é de $\pm 1^\circ$.

O ganho alcançado pelo sistema com seguimento solar, para um dia com poucas nuvens (Recife-Pernambuco), em relação a um sistema fixo foi de 31%.

Mavromatakis, et al., 2008. Neste trabalho é apresentado um novo seguidor azimutal, que através de uma mecânica sofisticada e com 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.

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. O autor descreve um seguidor solar que utiliza como elemento impulsor do equipamento um motor de passo. Com o uso deste tipo de motor não é necessário usar sistemas mecânicos sofisticados. O sistema de 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 $7,5^\circ$.

Mosalam Shaltout, et al., 1995. Os autores utilizam um seguidor solar de dois eixos, para realizar um experimento. O objetivo é comparar o rendimento de dois conjuntos de células policristalinas e amorfas, ambos com seguimento solar, sendo que um dos conjuntos

utiliza concentrador tipo V (com espelhos). Também foi comparado o ganho dos conjuntos sem o uso de seguidor solar.

O aumento de radiação solar sobre a superfície com seguimento solar e concentração foi de 62%, em relação ao conjunto só com seguimento.

Vilela, et al., 2003. Estudo com dois sistemas de conversão fotovoltaica, um com seguidor solar (de ajuste leste-oeste) e outro fixo. Os mesmos foram utilizados para bombeamento de água.

O experimento fez 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 determinar quando o conjunto está em frente ao Sol.

Hein, et al., 2003. Os autores apresentam um sistema de concentração que utiliza seguimento solar polar e espelho parabólico (duplo estágio), alcançam uma relação geométrica de concentração de até 300 vezes. Este valor é obtido normalmente com uso de seguidores de dois eixos. O trabalho foi realizado para aplicação em geração elétrica através de concentração fotovoltaica.

Poulek, et al., 2000. Este trabalho relata, de forma sucinta, um concentrador com seguidor solar polar. O mesmo utiliza um concentrador tipo V, que é instalado no eixo motor do seguidor solar, mas de forma que apenas a metade do concentrador usual é utilizada. Dois módulos são instalados, um de cada lado do concentrador e dependendo da refletância do material de revestimento do mesmo o fator de concentração pode chegar a 1,7 vezes.

Para acionamento do impulsor elétrico e sensoriamento da posição solar é usada uma célula fotovoltaica de bifacial.

O aumento de produção anual de energia pode chegar a 100% em regiões áridas e a 70% na Europa central, quando comparado com um sistema fixo.

Roth, et al., 2004. Os autores 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 processador.

Os autores informam da possibilidade de utilizar o projeto em sistemas maiores, em painéis solares e concentradores.

Canãda, et al., 2007. Este trabalho descreve o desenvolvimento de um seguidor de dois eixos, utilizado para medidas de radiação solar através de um espectro radiômetro.

São utilizados dois motores de passo para correção do azimute e inclinação do conjunto. O posicionamento do instrumento em relação ao Sol é determinado por cálculos. Um diodo emissor de luz e um fotodetector são usados como chave liga-desliga, para através de cortes na base do seguidor, indicar a posição inicial do seguidor e norte geográfico.

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 realizada através da porta paralela do computador.

3. RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE EM PLANOS DE DIFERENTES ORIENTAÇÕES

3.1 A radiação solar

Algumas definições importantes precisam ser descritas para o entendimento dos cálculos usados em energia solar. A radiação eletromagnética emitida pelo Sol chega de forma uniforme no topo da atmosfera terrestre, e devido à distância os raios solares podem ser considerados paralelos uns aos outros. O valor da constante solar é $I_{sc} = 1367 \text{ Wm}^{-2}$.

Conceitos importantes e usuais em energia solar [Duffie et al., 1991]:

- a) Irradiância (Wm^{-2}) - taxa de energia radiante incidente em uma superfície por unidade de área desta.
- b) Irradiação (Whm^{-2} ou Jm^{-2}) - energia incidente por unidade de área em uma superfície, obtida por integração da irradiância em um tempo específico.
- c) Radiação direta - radiação solar recebida do Sol sem dispersão da atmosfera terrestre.
- d) Radiação difusa - radiação solar recebida do Sol, após sofrer dispersão atmosférica.
- e) Radiação Global - soma das componentes, direta e difusa recebida em uma superfície.

A energia que chega ao topo da atmosfera terrestre está distribuída ao longo do espectro da radiação solar (ver Apêndice I).

A geometria que relaciona o Sol e a Terra é caracterizada por uma órbita elíptica de um ano descrita pela Terra ao redor do Sol (o plano que a contém chama-se eclíptica). A Terra gira em um eixo central chamado eixo polar que forma um ângulo de $23,45^\circ$ com a normal da eclíptica.

A variação da distância da Terra ao Sol é devida à excentricidade da órbita planetária. A Figura 3.1 mostra a órbita imaginária de uma unidade astronômica (IUA) comparada com a órbita imaginária terrestre ($IUA \times E_o$).

O fator de correção de excentricidade E_o pode ser representada pela equação (3.1):

$$E_o = 1,00011 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,00128 \sin \Gamma + 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \sin 2\Gamma \quad (3.1)$$

onde Γ é o ângulo do dia (em radianos), e pode ser calculado por:

$$\Gamma = \frac{2\pi (dn - 1)}{365} \quad (3.2)$$

onde dn é o dia do ano (ex.: 2 de fevereiro = 33 dias $\Rightarrow dn$).

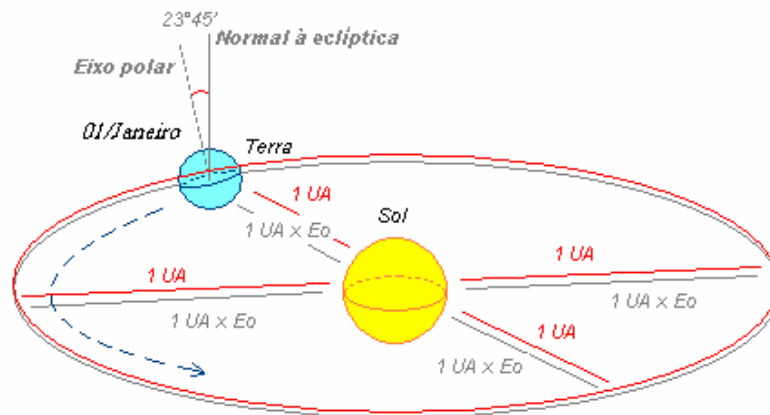


Figura 3.1 Excentricidade da órbita terrestre.

Uma equação bem mais simples, e que pode ser usada na maioria das aplicações de engenharia é a seguinte:

$$E_o = 1 + 0,033 \cos \left[\frac{2\pi (dn)}{365} \right] \quad (3.3)$$

A variação constante entre o plano da eclíptica e o plano equatorial celeste forma o ângulo de declinação solar (δ), o qual se calcula usando a equação (3.4):

$$\begin{aligned} \delta = & 0,006918 - 0,399912 \cos \Gamma + 0,70257 \sin \Gamma - 0,006758 \cos 2\Gamma + \\ & + 0,000907 \sin 2\Gamma - 0,002697 \cos 3\Gamma + 0,00148 \sin 3\Gamma \end{aligned} \quad (3.4)$$

ou simplesmente para uma grande quantidade de usos em engenharia a equação (3.5):

$$\delta = 23,45 \sin \left[(dn + 284) \frac{2\pi}{365} \right] \quad (3.5)$$

Estas equações simplificadas são baseadas na consideração de que a órbita terrestre ao redor do Sol é circular e tem velocidade constante.

Outro fator a ser comentado é a hora solar que é diferente da hora oficial local. O tempo solar é baseado no movimento angular aparente do Sol, onde o meio dia solar é o momento em que o Sol cruza o meridiano local. Para o cálculo correto, usam-se dois fatores de correção, o primeiro é a diferença do meridiano do observador em relação ao meridiano da hora oficial, o segundo é a equação do tempo que considera a perturbação da taxa de rotação da Terra. A hora solar (ou tempo solar verdadeiro - TSV) está relacionada com a hora local pela seguinte equação:

$$TSV = TO + 4(L_{st} - L_{oc}) + E_t \quad (3.6)$$

onde TO é a hora oficial, L_{st} é a longitude padrão (na hora de Brasília é 45° oeste), L_{oc} é a longitude local, e E_t a equação do tempo que é calculada com a equação (3.7)

$$E_t = (0,000075 + 0,001868 \cos \Gamma - 0,032077 \sin \Gamma - 0,014615 \cos 2\Gamma - 0,04089 \sin 2\Gamma) \quad (3.7)$$

(229,18)

onde, Γ é o ângulo do dia conforme equação (3.2).

O ângulo de zênite (θ_z) é formado entre a vertical local e a direção dos raios solares;

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (3.8)$$

onde ω é o ângulo horário, δ é o ângulo de declinação solar, ϕ é a latitude local.

O ângulo de altitude solar (α) é formado entre a direção dos raios solares e o plano horizontal, valendo 0° ao nascer e pôr do Sol.

$$\text{sen } \alpha = \text{sen } \delta \text{ sen } \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (3.9)$$

ou simplesmente,

$$\alpha = 90 - \theta_z \quad (3.10)$$

O ângulo horário (ω) é medido entre o meridiano local e o solar, valendo 0° ao meio-dia, variando 15° por hora, sendo negativo pela manhã e positivo após o meio-dia. Pode-se calcular ω , usando-se a seguinte expressão:

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (3.11)$$

onde TSV tempo solar verdadeiro, o valor obtido é em graus. Também se pode usar a equação (3.12).

$$\omega = \{[(H_n - 12)60] + m_n\} \frac{1}{4} \quad (3.12)$$

onde H_n é o número de horas do TSV (0 a 24 horas) e m_n é o número de minutos. O valor obtido é em graus.

O ângulo de azimute solar (γ_s), é a medida entre o plano do meridiano local e o plano máximo do círculo que passa pelo zênite e o Sol. É obtido através da equação (3.13).

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \alpha \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \phi} \quad (3.13)$$

Pode-se calcular o ângulo de nascer do Sol ω_s (e, conseqüentemente, o do pôr-do-sol, ângulos simétricos), usando-se a equação:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \phi) \quad (3.14)$$

Com o valor de ω_s calcula-se o número de horas de luz solar Nd do dia, aproveitando-se a simetria angular da manhã e tarde, assim

$$Nd = \frac{2}{15} \omega_s \quad (3.15)$$

Na Figura 3.2, se visualiza uma superfície inclinada e os ângulos pertinentes a esta geometria, que são:

- Ângulo de incidência direta (θ_s) sobre uma superfície, formado pela normal desta e o vetor Sol-Terra.
- Ângulo de azimute terrestre (γ), medido entre a projeção da normal da superfície no plano horizontal e o meridiano local.

- Ângulo de inclinação (β) da superfície em relação ao plano horizontal.

E ângulos já descritos anteriormente:

- Ângulo de zênite (θ_z).
- Ângulo de altitude solar (α).
- Ângulo de azimute solar (γ_s).

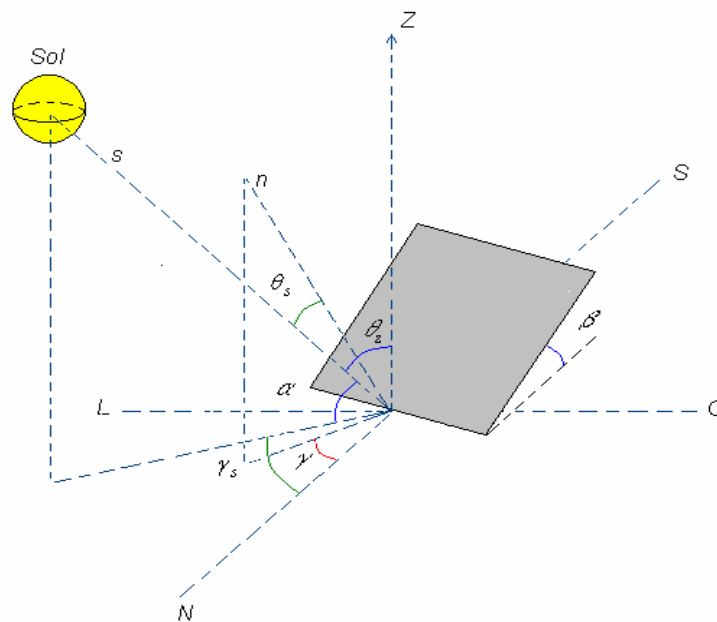


Figura 3.2 Ângulos de incidência direta, inclinação do painel e azimute terrestre.

O ângulo de incidência direta θ_s pode ser calculado com a equação geral (3.16).

$$\begin{aligned} \cos \theta_s = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (3.16)$$

Uma equação mais simples, que pode ser usada em várias aplicações, é

$$\cos \theta_s = \cos \beta \cos \theta_z + \sin \beta \sin \theta_z \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (3.17)$$

onde γ_s ângulo de azimute solar.

A equação (3.17) dá origem à equação (2.11) do ângulo de incidência direta no seguidor azimutal, onde o azimute terrestre e solar são iguais ($\gamma = \gamma_s$).

Para superfícies inclinadas (β graus) na direção norte ou sul (depende do hemisfério), pode-se usar a mesma relação para θ_s que é usada em uma superfície horizontal (θ_z). Para isto usa-se uma latitude artificial na equação (3.8), como segue: $(\phi - \beta)$ para o hemisfério norte, e $(\phi + \beta)$ para o hemisfério sul (ver figura A1.8 do Apêndice I). As novas equações ficam

$$\cos \theta_s = \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta \quad (3.18)$$

para o hemisfério norte, e

$$\cos \theta_s = \cos(\phi + \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi + \beta) \sin \delta \quad (3.19)$$

para o hemisfério sul.

Também pode-se calcular o ângulo de nascer do Sol para superfícies inclinadas conforme a equação abaixo:

$$\omega'_s = \cos^{-1}[-\tan \delta \tan(\phi \pm \beta)] \quad (3.20)$$

Assim os valores encontrados nas equações (3.14) e (3.20) devem ser comparados, devendo ser usado o menor ângulo do nascer do Sol.

A irradiação extraterrestre incidente em uma superfície horizontal, em um tempo específico, é calculada usando-se a equação (3.21):

$$I_o = \frac{12}{\pi} I_{sc} E_o \{ [\omega_2 - \omega_1] \text{sen } \delta \text{sen } \phi + \cos \delta \cos \phi (\text{sen } \omega_2 - \text{sen } \omega_1) \} \quad (3.21)$$

onde ω_2 e ω_1 são ângulos horários (em radianos) que definem, respectivamente, o final e o início do intervalo de tempo considerado.

Para superfícies inclinadas, o cálculo da irradiação extraterrestre sofre mudanças conforme a equação (3.22).

$$I_{o\beta} = \frac{12}{\pi} I_{sc} E_o \{ [\omega_2 - \omega_1] \text{sen } \delta \text{sen}(\phi \pm \beta) + \cos \delta \cos(\phi \pm \beta) (\text{sen } \omega_2 - \text{sen } \omega_1) \} \quad (3.22)$$

A unidade adotada para irradiação é (Whm^{-2}). O desenvolvimento destas equações (3.21) e (3.22) pode ser visto no Apêndice I.

3.2 Radiação solar na superfície terrestre

Neste item, é apresentada uma seqüência de equações para o cálculo da irradiação em uma superfície horizontal, inclinada (fixa) e inclinada em movimento, na superfície terrestre.

Todas as relações geométricas anteriormente citadas poderão ser usadas, mas, para o cálculo da irradiação, outras equações são descritas.

A radiação solar é desviada pela atmosfera terrestre antes de alcançar o solo. Suas diversas componentes interagem absorvendo, refletindo e dispersando. Assim modificam a irradiação sobre uma superfície. A pior situação é quando o céu está totalmente nublado ou com excesso de partículas sólidas, quando ocorre uma grande atenuação da radiação solar.

A radiação total que chega a uma superfície horizontal na Terra é chamada de global total e é composta por uma componente direta, radiação que manteve sua trajetória na atmosfera

e por uma componente difusa que sofreu atenuação atmosférica. A equação (3.22) representa esta composição:

$$G = G_b + G_d \quad (3.22)$$

onde G é a radiação global total, G_b radiação direta e G_d a radiação difusa.

Na determinação da irradiação solar na superfície terrestre o efeito das nuvens pode ser caracterizado por duas variáveis, índice de claridade ou transmitância atmosférica (K_t) e fração difusa (K_d). Um índice de claridade alto (próximo de 1) indica pouca ou total ausência de nuvens, caso contrário tem-se um grande índice da componente difusa.

É comum normalizar o valor de radiação global horizontal com seu correspondente extraterrestre, formando as seguintes relações de índice de claridade:

$$\bar{K}_t = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} \quad (3.23)$$

$$K_t = \frac{H}{H_o} \quad (3.24)$$

$$k_t = \frac{I}{I_o} \quad (3.25)$$

onde \bar{K}_t é valor médio mensal, K_t valor diário e k_t valor horário; e \bar{H} , H e I representam a irradiação global diária em média mensal, diária e horária, respectivamente; \bar{H}_o é o valor diário em média mensal da irradiação extraterrestre. A irradiação que chega à superfície terrestre não pode ser calculada analiticamente como a extraterrestre, mas pode ser estimada com o uso de alguns modelos estatísticos. Usualmente estes valores são medidos por instrumentos como o piranômetro para radiação global e o pirheliômetro para radiação direta I_b . A partir destes valores pode ser calculada a componente difusa I_d ($I=I_b+I_d$).

Para calcular a fração difusa usam-se estudos que correlacionam o índice de claridade com as relações de radiação difusa terrestre e radiação extraterrestre. Um dos métodos, mais empregado, para estimar a fração difusa média mensal e diária é o de Collares-Pereira e

Rabl, 1979, mostrado nas equações (3.26) e (3.27). Para estimar a fração difusa horária será utilizado o método de Orgill e Hollands, 1977, a equação é a (3.28).

$$\frac{\bar{H}_d}{H} = 0,775 + 0,347 \left(\frac{\pi}{180} \right) (\omega_c - 90) - \left[0,505 + 0,261 \left(\frac{\pi}{180} \right) (\omega_c - 90) \right] \cos(114,59 \bar{K}_t - 103,13) \quad (3.26)$$

onde ω_c em graus vale 90° de fevereiro a abril, 80° de agosto a outubro e 100° de novembro a janeiro;

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0,99 & \text{para } K_t \leq 0,17 \\ 1,188 - 2,272K_t + 9,473K_t^2 - 21,856K_t^3 + 14,648K_t^4 & \text{para } 0,17 \leq K_t \leq 0,75 \\ 0,54K_t^3 + 14,648K_t^4 & \text{para } 0,75 < K_t < 0,80 \\ 0,2 & \text{para } K_t \geq 0,80 \end{cases} \quad (3.27)$$

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0,249k_t & \text{para } 0 \leq k_t < 0,35 \\ 1,577 - 1,84k_t & \text{para } 0,35 \leq k_t \leq 0,75 \\ 0,177 & \text{para } k_t > 0,75 \end{cases} \quad (3.28)$$

Nas expressões acima \bar{H}_d , H_d e I_d representam a irradiação difusa diária média mensal, a média diária e horária, respectivamente. É importante mencionar que a fração difusa média mensal $\bar{K}_d = \frac{\bar{H}_d}{H}$ é determinada pela equação (3.26), e as demais frações K_d (difusa diária) e k_d (difusa horária) pela (3.27) e (3.28), nesta ordem.

A energia radiante incidente em uma superfície pode ser parcialmente refletida, absorvida ou transmitida, as propriedades de materiais associados com estas funções são refletância, absortância e transmitância. É comum usar o termo albedo (ρ) no lugar de refletância. O albedo pode ser definido como:

$$\rho = \frac{\text{radiação refletida por uma superfície}}{\text{radiação incidente em uma superfície}} \quad (3.29)$$

Em superfícies inclinadas, a radiação refletida pela superfície do entorno irá compor a componente difusa, ou seja, as características de refletância ou albedo irão influir na quantidade de radiação difusa recebida por esta superfície. O albedo depende da distribuição

espectral da radiação incidente e sofre influência da altitude solar, quanto mais alto menor é o albedo. As superfícies aquáticas ainda interferem no albedo com a refração e o ângulo de incidência.

Para o cálculo da irradiação refletida (albedo) considera-se a reflexão como isotrópica.

A Tabela 3.1 lista alguns tipos de superfícies e o valor do coeficiente de albedo para as mesmas [Garcia, 2004]:

Tabela 3.1 – Albedo de algumas superfícies

| Superfície | Albedo | Superfície | Albedo |
|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| Água (Sol alto) | 0,03-0,07 | Gelo no mar | 0,30-0,40 |
| Água (Sol baixo) | 0,15-0,65 | Neve fresca | 0,75-0,95 |
| Areia | 0,20-0,40 | Neve velha | 0,40-0,70 |
| Areia amarelada | 0,35 | Nuvens | 0,30-0,85 |
| Areia branca | 0,34-0,40 | Rodovia preta | 0,05-0,10 |
| Areia de rio | 0,43 | Terra arada umedecida | 0,14 |
| Areia gris | 0,18-0,23 | Terra cultivada | 0,10-0,30 |
| Areia ligeira fina | 0,37 | Terra gris seca | 0,25-0,30 |
| Bosques | 0,10-0,18 | Terra gris umedecida | 0,10-0,20 |
| Desertos | 0,25-0,30 | Terra sem vegetação | 0,04-0,25 |
| Ervas | 0,16-0,26 | Terra negra seca | 0,14-0,08 |
| Floresta de coníferas | 0,05-0,15 | Terra negra umedecida | 0,14-0,08 |
| Gelo glacial | 0,20-0,40 | Tundra | 0,15-0,20 |

Fontes: Cabrerizo, 1987; CIEMAT, 1995; Moram e Morgan, 1991.

Para o cálculo da irradiação terrestre global horária em uma superfície inclinada I_{β} , consideram-se as componentes de irradiação direta $I_{b\beta}$, difusa $I_{d\beta}$ e refletida $I_{r\beta}$, todas para esta inclinação β , conforme a equação:

$$I_{\beta} = I_{b\beta} + I_{d\beta} + I_{r\beta} \quad (3.30)$$

em que a unidade é em (Whm^{-2}).

A componente refletida é calculada pela equação (3.31):

$$I_{r\beta} = \frac{1}{2} I \rho (1 - \cos \beta) \quad (3.31)$$

em que I é irradiação global sobre superfície horizontal terrestre.

A componente direta é dada pela equação (3.32):

$$I_{b\beta} = I_b \left(\frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_z} \right) = I_b R_b \quad (3.32)$$

em que I_b é a irradiação direta sobre superfície horizontal, R_b é o fator geométrico conforme Duffie et al, 1991.

Uma equação simples para determinar a componente de irradiação difusa é o modelo isotrópico (Liu e Jordan, 1961):

$$I_{d\beta} = \frac{1}{2} I_d (1 + \cos \beta) \quad (3.33)$$

onde I_d é a irradiação difusa horizontal terrestre (deve ser determinada pela equação (3.28)).

Pelas inúmeras variáveis que influenciam na distribuição da radiação difusa no céu um dos modelos mais usados é o de Perez et al, 1987, também adotado no presente trabalho. Este é um modelo anisotrópico e leva em consideração uma radiância difusa incremental na região circunsolar e numa parte do horizonte. No resto do céu assume uma radiância constante. O valor

do incremento circunsolar (coeficiente F_1) e horizontal (coeficiente F_2) é função de três parâmetros que determinam as condições do céu a cada momento. São eles:

- Ângulo de zênite solar θ_z .
- Parâmetro de brilho Δ :

$$\Delta = \frac{m_a I_d}{I_{on}} \quad (3.34)$$

onde m_a é a massa de ar, e I_{on} ($I_{on} = I_{sc} E_o$) é a irradiação extraterrestre normal.

- Parâmetro de transparência (claridade) ε :

$$\varepsilon = \frac{I_d + I_{bn}}{I_d} \quad (3.35)$$

onde I_{bn} é irradiação direta normal.

A equação geral para o cálculo de irradiação difusa para uma superfície inclinada segundo Perez et al. 1987, é

$$I_{d\beta} = I_d \left[\frac{1}{2} (1 + \cos \beta) (1 - F_1) + F_1 \left(\frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_z} \right) + F_2 \sin \beta \right] \quad (3.36)$$

onde os coeficientes F_1 e F_2 são obtidos com as equações:

$$F_1 = F_{11}(\varepsilon) + F_{12}(\varepsilon)\Delta + F_{13}(\varepsilon)\theta_z \quad (3.37)$$

$$F_2 = F_{21}(\varepsilon) + F_{22}(\varepsilon)\Delta + F_{23}(\varepsilon)\theta_z \quad (3.38)$$

onde os valores de F_{ij} são descritos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Coeficientes do modelo Perez

| Intervalo | ε | F_{11} | F_{12} | F_{13} | F_{21} | F_{22} | F_{23} |
|-----------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 1,000 a 1,056 | -0,042 | 0,550 | -0,044 | -0,120 | 0,138 | -0,034 |
| 2 | 1,056 a 1,253 | 0,261 | 0,559 | -0,243 | -0,019 | 0,083 | -0,081 |
| 3 | 1,253 a 1,586 | 0,481 | 0,460 | -0,354 | 0,077 | 0,006 | -0,116 |
| 4 | 1,586 a 2,134 | 0,825 | 0,187 | -0,532 | 0,172 | -0,050 | -0,151 |
| 5 | 2,134 a 3,230 | 1,102 | -0,299 | -0,586 | 0,350 | -0,398 | -0,171 |
| 6 | 3,230 a 5,980 | 1,226 | -0,451 | -0,617 | 0,444 | -0,949 | -0,073 |
| 7 | 5,980 a 10,080 | 1,367 | -0,838 | -0,655 | 0,431 | -1,750 | 0,094 |
| 8 | 10,080 a ∞ | 0,978 | -0,812 | -0,393 | 0,335 | -2,160 | 0,186 |

Para o cálculo da irradiação terrestre global horária em uma superfície inclinada e com movimento (correção do azimute) $I_{\beta m}$, consideram-se as componentes de irradiação direta $I_{b\beta m}$, difusa $I_{d\beta}$ e refletida $I_{r\beta}$, todas com inclinação β , conforme a equação (3.39).

$$I_{\beta m} = I_{b\beta m} + I_{d\beta} + I_{r\beta} \quad (3.39)$$

O valor de $I_{d\beta}$ é determinado usando a equação (3.36), para $I_{r\beta}$ se usa a equação (3.31) e o valor de $I_{b\beta m}$ é calculado com a equação (3.40), onde o co-seno do ângulo de incidência direta é calculado com a equação (2.11). O fator geométrico para esta superfície com movimento de correção de azimute é representado por (R'_b).

$$I_{b\beta m} = I_b \left(\frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_z} \right) = I_b R'_b \quad (3.40)$$

3.3 Cálculos da irradiação sobre uma superfície fixa ou em movimento (inclinadas), a partir da irradiação global medida por um piranômetro.

Com as medidas da radiação global sobre uma superfície horizontal, se podem estimar os valores de radiação sobre uma superfície fixa com direção e inclinação qualquer ou em uma superfície com movimento de correção de azimute e inclinação qualquer. Para os dois casos, se começa determinando a irradiância extraterrestre para o dia e para cada instante das medidas. Após, deve-se seguir a seqüência de uso das seguintes equações:

- 1) Equação (3.25), para achar o valor do k_r para o instante da medida.
- 2) Equação (3.28) (Orgill et al,1977), determina-se k_d .
- 3) Com o valor de k_d determina-se $I_d = I \cdot k_d$ e após $I_b = I - I_d$ (valores para uma superfície horizontal).
- 4) Após aplica-se o modelo Perez, equação (3.36) para determinar $I_{d\beta}$.
- 5) Para superfície fixa usar as equações (3.17) e (3.32) para determinar $I_{b\beta}$.

6) Para superfície em movimento, usar as equações (2.11) e (3.40) para determinar $I_{\beta m}$.

7) Para determinar a componente refletida $I_{r\beta}$, usar a equação (3.31).

Com os valores estimados para cada instante de medida, basta somar as componentes e determinar o valor da irradiação sobre a superfície fixa (I_{β}) e em movimento ($I_{\beta m}$) para aquele instante. Ao somar o conjunto de valores determinados para o período de uma hora ou de um dia, será obtida a irradiação horária ou diária para os dois tipos de montagem a partir das medidas de radiação global.

4. MODELAGEM E FUNCIONAMENTO DE GERADORES FOTOVOLTAICOS

4.1 Células fotovoltaicas: histórico

Em 1839, Edmond Becquerel observou que placas metálicas, de platina ou prata, quando mergulhadas em um eletrólito e expostas à luz produziam uma pequena diferença de potencial, este fenômeno foi denominado de efeito fotovoltaico. Em 1884, Charles Fritts produziu a primeira célula fotovoltaica usando selênio, a característica de fotocondutividade deste material foi descoberta por Smith em 1873.

A eficiência da célula de selênio não chegava a 1%, mas com a evolução científica do início do século XX, principalmente a explicação do efeito fotoelétrico por Albert Einstein em 1905, a mecânica quântica com a teoria das bandas de energia, física dos semicondutores com os processos de purificação e dopagem aplicadas aos transistores, em 1954 foi anunciada a primeira célula fotovoltaica usando silício (com eficiência de 6%), desenvolvida pelos pesquisadores Calvin Fuller (químico), Gerald Pearson (físico) e Daryl Chapin (engenheiro), todos do laboratório da Bell em Murray Hill, New Jersey, nos Estados Unidos da América [Vallêra et al., 2006].

4.2 Células de silício cristalino

O silício é um material semicondutor encontrado em grande abundância na natureza. Seu número atômico é 14, ou seja, possui 14 prótons e 14 elétrons. Sua massa atômica é 28 e representa a soma dos prótons e nêutrons contidos em seu núcleo. A distribuição dos elétrons de um átomo se dá em camadas ao redor de seu núcleo, o que determina o seu estado energético. A situação energética de cada elétron é definida pelos 4 números quânticos: principal (n), azimutal ou secundário (l), magnético (m) e spin (S).

O silício tem sua distribuição do número quântico principal como segue: $K=2$, $L=8$ e $M=4$ (K, L e M são níveis energéticos), ou seja, sua camada de valência (a mais externa) possui 4 elétrons e em uma rede cristalina de silício cada átomo se liga de forma covalente (compartilha elétrons) com outros quatro átomos e assim sucessivamente, tornando a camada de valência completa com 8 elétrons. Na temperatura ambiente, algumas ligações covalentes são rompidas e elétrons ficam livres e conseqüentemente abandonam a ligação, e um saldo de carga positiva fica no local anteriormente ocupado pelo elétron, chamando-se este de lacuna (ou buraco), uma

ligação covalente incompleta. No silício, a energia necessária (energia de gap) para que um elétron passe da banda de valência para banda de condução é de 1,1 eV ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).

Através da dopagem do silício intrínseco com material pentavalente (doadores de elétrons) como o fósforo (arsênio, antimônio, etc.), se produz semiconductor do tipo N; se a impureza para dopagem for trivalente (aceitadores de elétrons) tal como o boro (gálio, índio, etc.), o semiconductor será do tipo P. Unindo-se os materiais, esta região é denominada de junção P-N. Na interface desta haverá por difusão o deslocamento de elétrons do material N para P, e de lacunas do material P para N. Como consequência, é gerado um campo elétrico interno (V_0) que se opõe à difusão original, tornando nula a corrente através da interface. Agora, se elétrons na banda de valência forem atingidos por fótons com energia suficiente para excitá-los até a banda de condução serão formados pares elétron-lacuna e os elétrons irão se deslocar para a região N e as lacunas para região P. Este efeito irá perdurar enquanto houver luz sobre a junção P-N (efeito fotovoltaico). A Figura 4.1 mostra alguns detalhes do processo descrito.

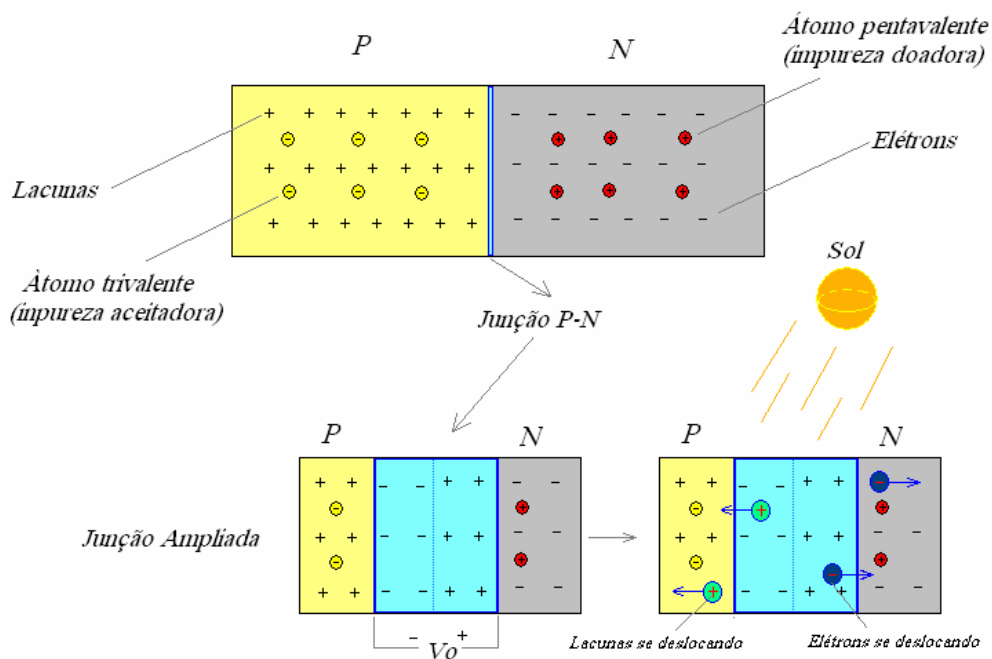


Figura 4.1 Junção P-N.

Se um fio for ligado a este dispositivo, haverá um fluxo de corrente elétrica, chamado de fotocorrente. Sua intensidade é proporcional à irradiância que incidir sobre a junção.

A Figura 4.2 ilustra uma célula fotovoltaica com seus principais elementos; os contatos de ligação são metalizados no processo de fabricação, sendo os frontais (geralmente o terminal negativo) em forma de grade para a passagem da luz solar. Também é aplicada uma cobertura anti-reflexiva na superfície da célula para diminuir as perdas por reflexão.

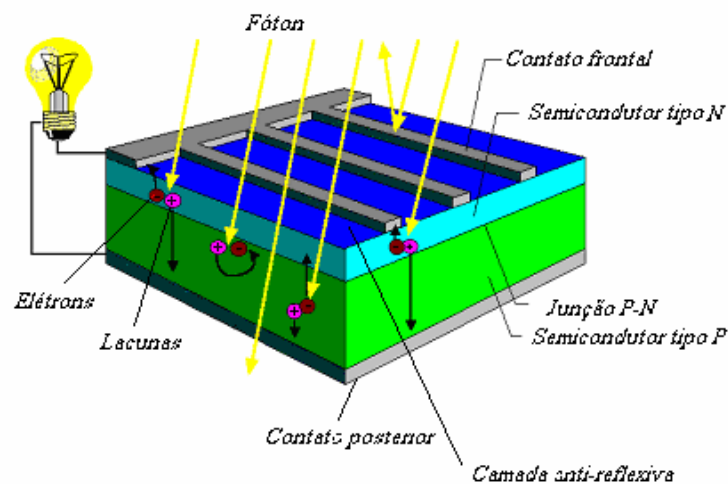


Figura 4.2 Célula fotovoltaica.

4.3 Modelagem matemática de uma célula fotovoltaica

A célula fotovoltaica é analisada como um diodo retificador (junção P-N) e uma fonte de corrente, seu circuito simplificado é visto na Figura 4.3.

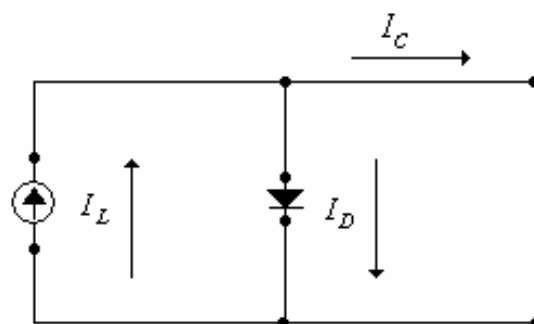


Figura 4.3 Circuito simplificado (célula fotovoltaica).

A fonte de corrente I_L representa a corrente fotogerada, I_D é a corrente que circula no diodo (no escuro) e I_C é a corrente que circula pela célula e pode ser calculada como segue;

$$I_C = I_L - I_D \quad (4.1)$$

a corrente I_D pode ser determinada pela seguinte equação [Shalimova, 1975]:

$$I_D = I_o \left\{ \exp\left(\frac{eV}{mkT}\right) - 1 \right\} \quad (4.2)$$

onde I_o é a corrente de saturação reversa, e é a carga elétrica do elétron, V a tensão nos terminais da célula, m o fator de idealidade do diodo (valor entre 1 e 2), k é a constante de Boltzman e T a temperatura absoluta da célula.

Substituindo a equação 4.2 em 4.1 é obtida a expressão que relaciona a corrente da célula fotovoltaica (I_C) com a tensão (V), como segue:

$$I_C = I_L - I_o \left\{ \exp\left(\frac{eV}{mkT}\right) - 1 \right\} \quad (4.3)$$

A partir da equação 4.3 duas situações importantes se destacam:

- Célula fotovoltaica com curto circuito externo: a tensão em seus terminais é nula, $V=0$, tem-se $I_L=I_C$ e pela equação (4.1) $I_D=0$. Assim, a corrente de curto circuito I_{SC} será igual à corrente fotogerada ($I_{SC} = I_L$).
- Circuito aberto: quando a célula está com seus terminais desconectados de uma carga, a corrente I_C será nula ($I_C=0$) e a tensão de circuito aberto V_{OC} autopolarizará a célula fazendo que a corrente do diodo seja igual à fotocorrente ($I_D = I_L$).

A corrente I_{SC} e a tensão V_{OC} , são características da célula e são fornecidas pelo fabricante para determinadas condições de radiação e temperatura.

Em algumas bibliografias, é citado o termo tensão térmica da célula (V_T), que é a relação (4.4), a qual está contida na equação (4.2).

$$V_T = \frac{kT}{e} \quad (4.4)$$

Em uma célula fotovoltaica real, outros fatores devem ser considerados, tais como, uma resistência série R_S , que representa a resistência da célula, e uma resistência paralela R_P , que corresponde às correntes de fuga. A Figura 4.4 apresenta um modelo de circuito mais completo que serve para o estudo de uma célula ou de um módulo fotovoltaico.

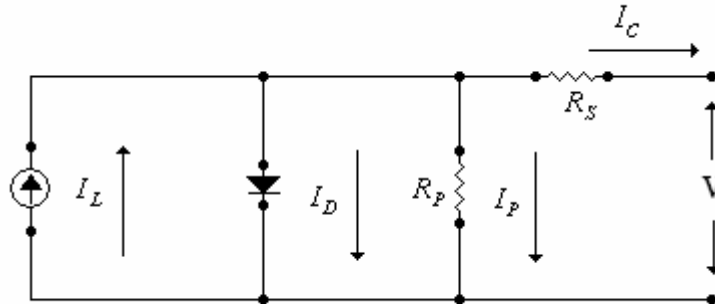


Figura 4.4 Circuito completo (célula fotovoltaica).

A equação que representa o modelo completo é:

$$I_C = I_L - I_D - I_P \quad (4.5)$$

onde I_P é a corrente de fuga da célula.

A corrente de fuga I_P pode ser determinada com a equação abaixo.

$$I_P = \frac{V + I_C R_S}{R_P} \quad (4.6)$$

A equação da corrente do diodo para este modelo terá o acréscimo do valor da tensão nos terminais da resistência R_S .

$$I_D = I_0 \left\{ \exp\left(\frac{e(V + I_C R_S)}{mkT}\right) - 1 \right\} \quad (4.7)$$

Substituindo na equação 4.5 os valores de I_P e I_D , pelas equações 4.6 e 4.7 respectivamente, chega-se à equação 4.8.

$$I_C = I_L - I_o \left\{ \exp\left(\frac{e(V + I_C R_S)}{mkT}\right) - 1 \right\} - \frac{V + I_C R_S}{R_p} \quad (4.8)$$

4.4 Modelagem do módulo fotovoltaico

Se n células fotovoltaicas com características iguais forem associadas em série, se obtém um módulo fotovoltaico com capacidade de fornecer corrente elétrica ($I_{série}$) igual a corrente (I_{cn}) de uma das células isoladamente, mas fornecerá uma tensão ($V_{série}$) que será a soma de todas as tensões (V_{cn}) das n células, ou seja:

$$I_{série} = I_{c1} = I_{c2} = \dots = I_{cn} \quad (4.9)$$

$$V_{série} = V_{c1} + V_{c2} + \dots + V_{cn} = n.V_{cn} \quad (4.10)$$

onde o subscrito cn indica o número da célula associada ($c1, c2, \dots$).

Quando a associação das células fotovoltaicas for paralela, a tensão ($V_{paralela}$) será igual à tensão (V_{cn}) gerada por uma célula e a corrente elétrica ($I_{paralela}$) será a soma da corrente (I_{cn}) gerada por todas as células do conjunto.

$$I_{paralela} = I_{c1} + I_{c2} + \dots + I_{cn} = n.I_{cn} \quad (4.11)$$

$$V_{paralela} = V_{c1} = V_{c2} = \dots = V_{cn} \quad (4.12)$$

Na maioria dos módulos fotovoltaicos, a associação em série é a mais utilizada para obter tensões acima de 12 volts, o que facilita a carga de baterias com tensões nominais desta ordem.

O modelo matemático para um módulo fotovoltaico pode ser definido pela equação 4.13, que determina a tensão e a corrente através dos parâmetros Ns (número de células em série) e Np (número de células em paralelo), respectivamente [Hecktheuer, 2001]:

$$I_{arranjo} = Np \cdot \left[I_L - I_o \left\{ \exp\left(\frac{e(V_{arranjo} + I_C R_S)}{Ns \cdot mkT}\right) - 1 \right\} - \left(\frac{V_{arranjo} + I_C R_S}{R_p} \right) \right] \quad (4.13)$$

Geralmente, $Np = 1$ (quando $I_{arranjo} = I_C$, pois não tem ligação paralela de células); a corrente elétrica ($I_{arranjo}$) e a tensão ($V_{arranjo}$) representam os valores destes parâmetros após a associação das células fotovoltaicas que compõem o módulo. As resistências (série e paralela) passam a ser de todo o conjunto.

4.5 Curva característica de uma célula fotovoltaica

A curva característica de uma célula fotovoltaica de silício assemelha-se ao gráfico da tensão versus corrente (I - V) de um diodo iluminado. Para um melhor entendimento desta importante curva, a Figura 4.5 mostra as curvas de um diodo:

- No escuro (1º quadrante).
- Iluminado (4º quadrante).
- Iluminado e com sua curva rebatida para o 1º quadrante (por convenção).

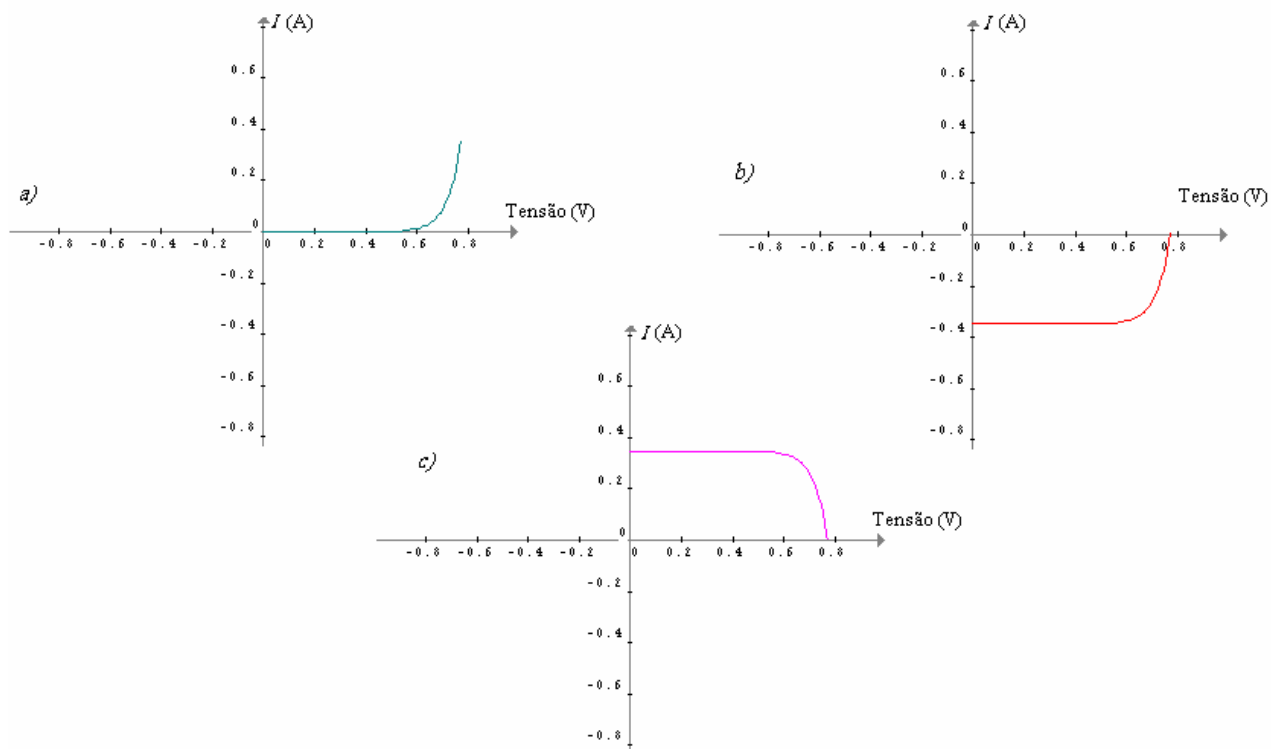


Figura 4.5 Curvas características de um diodo no escuro (a), iluminado (b) e curva rebatida sobre o eixo das abscissas (c) [adaptado de Prieb, 2002].

A curva (I - V) de um módulo fotovoltaico é semelhante à de uma célula, porém determinada pela equação (4.13). Na Figura 4.6, o gráfico de uma célula fotovoltaica e de um conjunto de células em série (aumento da tensão elétrica) é apresentado. Fica clara a importância da associação de células na montagem dos módulos, pois na maioria das aplicações a tensão gerada por uma única célula (na ordem de 0,6 V) é insuficiente para alimentar eletricamente equipamentos ou máquinas. Em boas condições de radiação solar, uma célula pode fornecer uma corrente elétrica da ordem de 30 mA/cm², o que é suficiente para inúmeras aplicações após alcançar, através de associações, tensões acima de 6 volts. Correntes bem maiores que a nominal podem ser alcançadas com conjuntos de células em paralelo. Na prática, o que se encontra são associações mistas (ligação de células em série e paralelo).

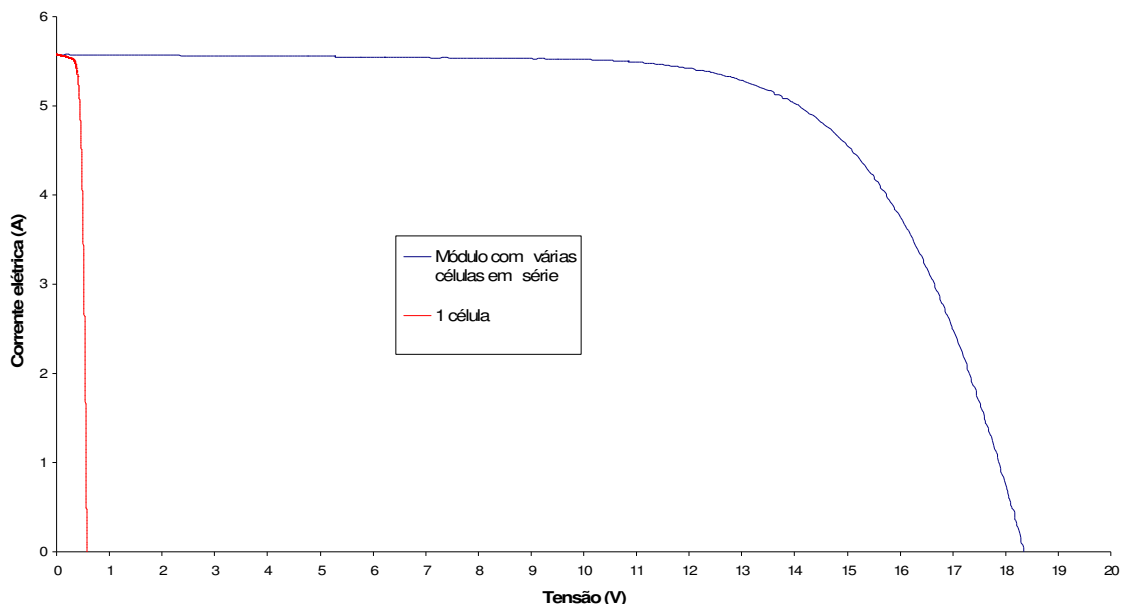


Figura 4.6 Gráfico de uma célula fotovoltaica e associação série de várias células.

Na figura 4.7 observa-se a curva de um módulo fotovoltaico e três pontos importantes de operação. Dois destes já foram mencionados (na equação 4.3), a corrente de curto circuito (I_{SC}) e a tensão de circuito aberto (V_{OC}) e em ambos a potência é zero. O terceiro é o ponto de máxima potência P_M sendo seu valor determinado pelo produto da tensão máxima V_M pela corrente máxima I_M ($P_M = V_M I_M$).

Em projetos de sistemas fotovoltaicos, o ponto de máxima potência é obtido por equipamentos (seguidor de ponto de máxima potência) que analisam a corrente elétrica e a tensão que estão sendo geradas pelo sistema e polarizam os módulos de forma a trabalharem em

seu ponto de maior produção energética. Estes equipamentos são usados em sistemas autônomos ou conectados a rede elétrica.

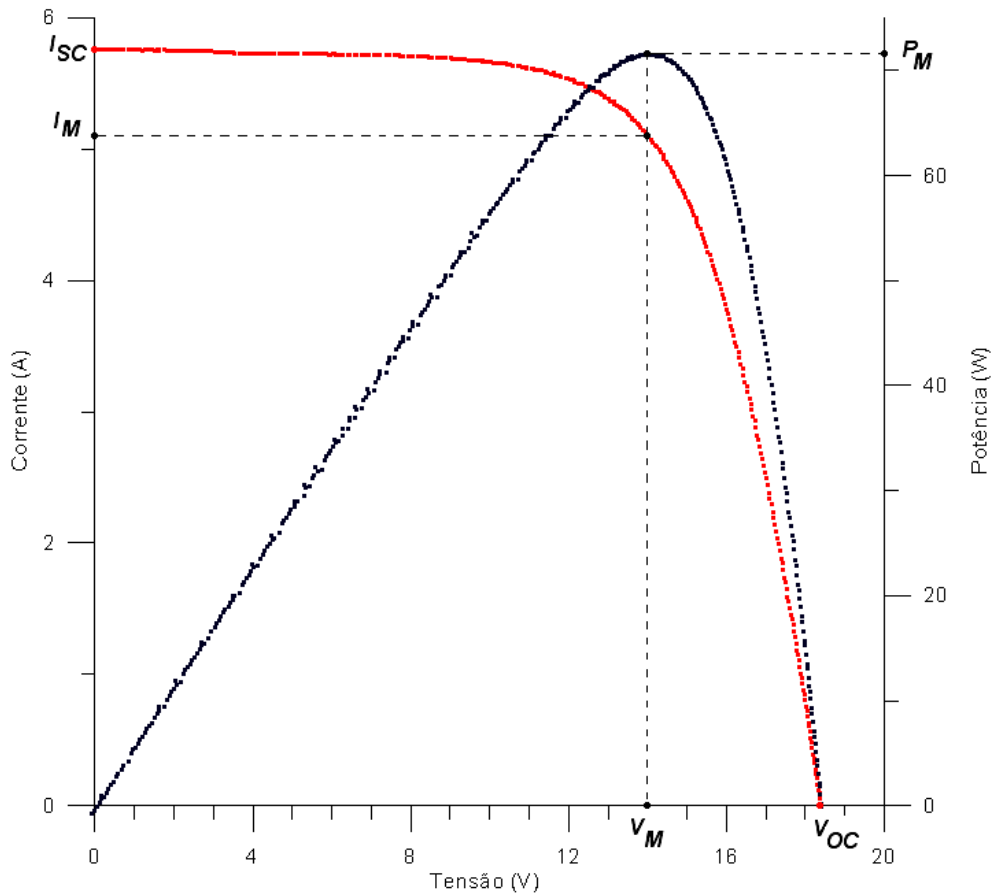


Figura 4.7 Curva de um módulo, pontos: V_{OC} , I_{SC} , V_M , I_M e P_M ; curva de potência.

4.6 Efeito da intensidade da radiação solar incidente sobre uma célula fotovoltaica

Sob condições de temperatura constante, a corrente de curto circuito (I_{SC}) varia proporcionalmente à variação da intensidade de radiação solar. A tensão de circuito aberto (V_{OC}) sofre pouca influência para irradiações entre 700 e 1000 Wm^{-2} , mas para pequenos valores de irradiância, ela decresce de forma logarítmica até chegar a zero ($G=0 \text{ Wm}^{-2}$).

A equação (4.14) determina o valor de I_{SC} com a variação da radiação:

$$I_{SC} = I_{SCr} \frac{G}{G_r} \quad (4.14)$$

onde I_{SCr} é a corrente de referência de curto circuito para a radiação de referência G_r .

Na Figura 4.8, apresentam-se as curvas de uma célula fotovoltaica para diferentes índices de radiação e a visualização da influência sobre I_{SC} e V_{OC} conforme descrito acima.

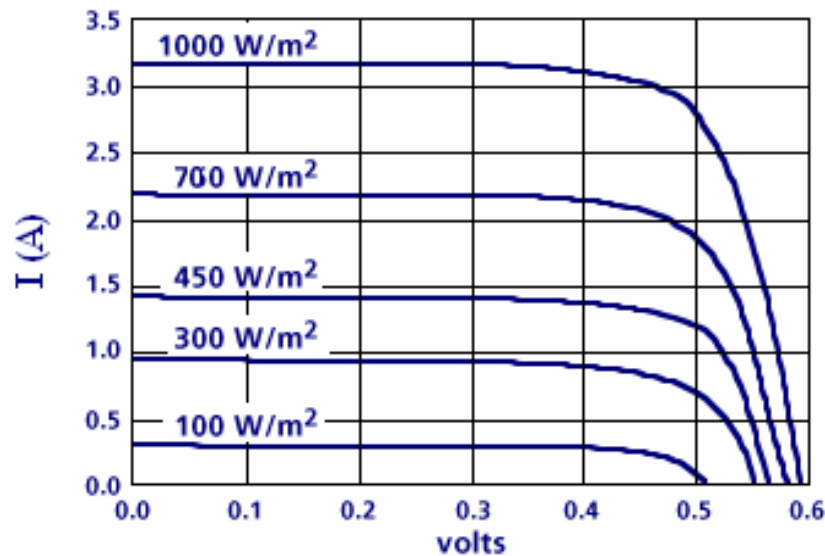


Figura 4.8 Efeito da variação da intensidade de radiação sobre a célula fotovoltaica

[adaptado de Castro, 2007].

4.7 Efeitos da variação da temperatura sobre a curva característica $I - V$

Quando se mantém a intensidade de radiação constante e se varia a temperatura da célula fotovoltaica há uma acentuada variação da tensão de circuito aberto V_{OC} , diminuindo aproximadamente 2 mV para cada grau Celsius de acréscimo na temperatura. Já a corrente de curto circuito I_{SC} sofre um aumento de seu valor na ordem de 0,06 % para o mesmo acréscimo de temperatura.

Na Figura 4.9, observa-se o efeito da variação da temperatura sobre uma célula com radiação incidente constante.

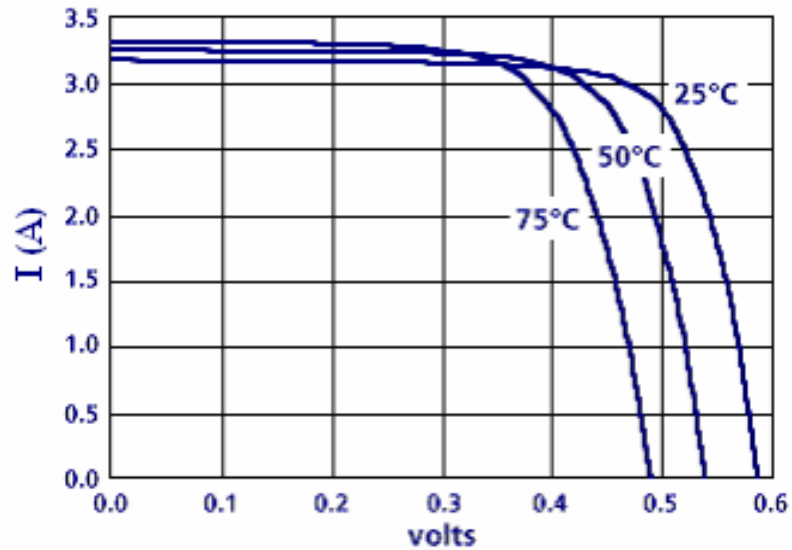


Figura 4.9 Célula fotovoltaica com radiação constante e submetida à variação de temperatura
[adaptado de Castro, 2007]

Dois parâmetros que relacionam a variação de temperatura com a corrente de curto circuito e a tensão de circuito aberto, são os coeficiente térmicos α_T e β_T , que são determinados como segue:

$$\alpha_T = \frac{\partial I_{SC}}{\partial T_c} \quad (4.15)$$

$$\beta_T = \frac{\partial V_{OC}}{\partial T_c} \quad (4.16)$$

onde T_c é a temperatura da célula.

5. SEGUIDOR SOLAR, MECÂNICA, ELETRÔNICA E CUSTOS

Neste capítulo serão descritas de forma sucinta as principais características mecânicas e elétricas do seguidor solar utilizado neste trabalho.

5.1 Mecânica do seguidor solar com movimento único no eixo vertical

O equipamento de seguimento solar empregado tem movimento único no eixo vertical (ajuste azimutal) e caracteriza-se pela simplicidade mecânica e robustez. Sua estrutura é construída com tubos e perfis de aço. O sistema mecânico de movimentação é baseado em um conjunto de polias e uma correia tipo V (trapezoidal) [Mendes, 2007] e usa como elemento impulsor um motor elétrico de corrente contínua (com caixa de redução), acoplado diretamente na polia de menor diâmetro. Sua velocidade máxima é de 40 rpm e através da relação de transmissão do sistema de polias, obtém-se uma redução de velocidade para até 6,6 rpm.

Um sistema baseado em transmissão por correia e polias se justifica pelo baixo custo de implementação, alto coeficiente de atrito (correia-polia), baixo índice de manutenção e operação silenciosa. O funcionamento se baseia na transmissão do movimento de rotação entre eixos pelo conjunto formado pelo acoplamento entre correia e polias. O eixo (motor) que causa o movimento e força tem uma polia que é chamada de motora, e a polia que recebe o movimento e a força é chamada de movida, pois está acoplada diretamente ao eixo movido.

Os tipos de correia usadas em máquinas podem ser lisa, trapezoidal ou dentada. Esta última é descartada pela maior complexidade mecânica envolvida. Neste equipamento foi escolhida a tipo V ou trapezoidal que tem menor deslizamento que a lisa e apresenta relação de transmissão de até 10:1. Além disso, permite boa proximidade entre eixos, partida com menor tensão prévia em relação à lisa, apresentando também menor carga os sobre mancais e baixo ruído.

Na Figura 5.1 são apresentados detalhes de alguns elementos de máquina usados no seguidor solar; um sistema de polias onde é possível visualizar o diâmetro médio e externo das mesmas. Também é possível observar a correta posição da correia tipo V na polia e sua altura total (h) e efetiva (x).

O cálculo da relação de transmissão entre polias é dado pela equação geral 5.1;

$$n_1 Dm_1 = n_2 Dm_2 \therefore i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{Dm_2}{Dm_1} \quad (5.1)$$

onde n_1 e n_2 são o número de rotações por minuto (rpm) na polia 1 e na polia 2 respectivamente, Dm_1 e Dm_2 são os diâmetros médios das polias 1 e 2, nesta ordem, e i é o índice de relação entre polias. Na equação 5.2 é apresentada a fórmula para determinar o diâmetro médio da polia usada em função da correia escolhida;

$$Dm = De - 2x \quad (5.2)$$

onde Dm é o diâmetro médio da polia, De é o diâmetro da polia e x é altura efetiva da correia.

A equação 5.3 determina a menor distância entre eixos da máquina:

$$P_e = D + (3/2)h \quad (5.3)$$

onde D é o diâmetro da polia maior, h é a altura da correia e P_e é a distância entre eixos da máquina.

Deve-se observar que as velocidades tangenciais em ambas as polias são iguais, ou seja, $V_1 = V_2$ e o que varia é a velocidade angular.

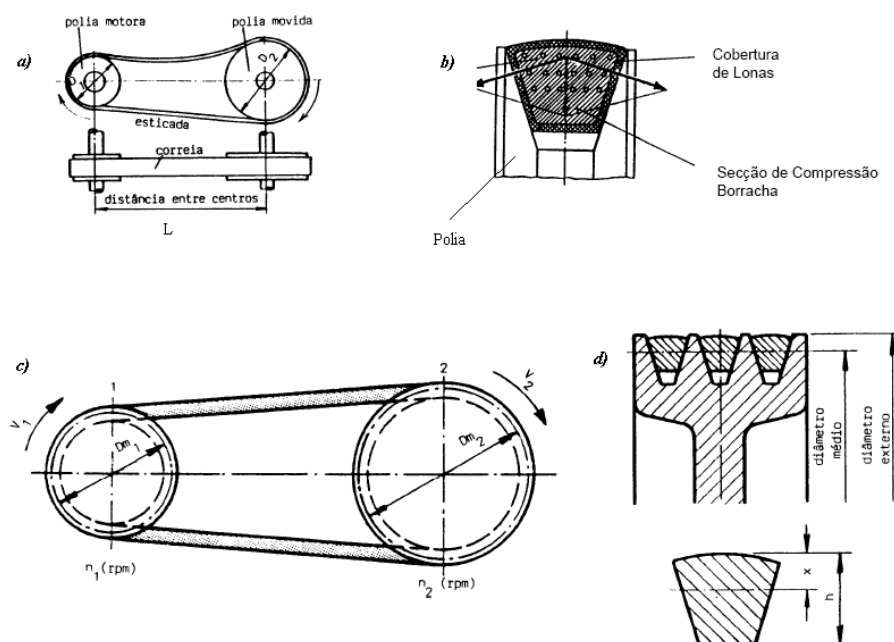


Figura 5.1 Sistema de polias (a), correia tipo V (b), polias com correia tipo V (c), elementos da correia tipo V em um sistema de polias (d). [Fonte: Manual SENAI-ES]

Na Figura 5.2 são mostrados detalhes do sistema de polias, do braço horizontal de sustentação dos painéis fotovoltaicos e do motor impulsor do seguidor solar.



Figura 5.2 Polias, braço horizontal e motor impulsor

Na Figura 5.3 visualiza-se a ilustração da seqüência de montagem da máquina, onde se tem, eixo movido, rolamentos e polia movida (maior diâmetro) formando a peça que irá receber movimento do conjunto impulsor. Após, é colocado um tubo mecânico para proteção dos rolamentos e é juntado o conjunto ao tubo de montagem do equipamento que irá suportar as demais partes que compõem o seguidor solar, tais como, o motor elétrico e a polia de movimento (polia motora do sistema impulsor) e o eixo horizontal de fixação dos painéis fotovoltaicos (que não aparece nesta figura).

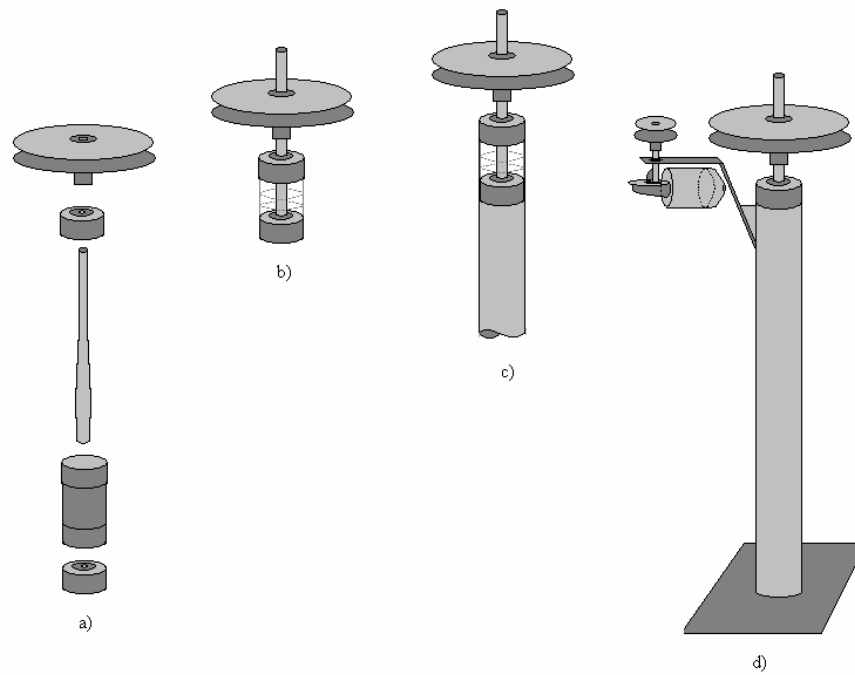


Figura 5.3 Seqüência de montagem da máquina de seguimento solar.

Na Figura 5.4 pode-se observar a máquina montada e seus principais elementos, tais como, polias, correia trapezoidal e também o motor elétrico que é o elemento impulsor do conjunto, notando-se a ponta do eixo vertical (movido) onde será acoplado o eixo horizontal de sustentação dos painéis fotovoltaicos.

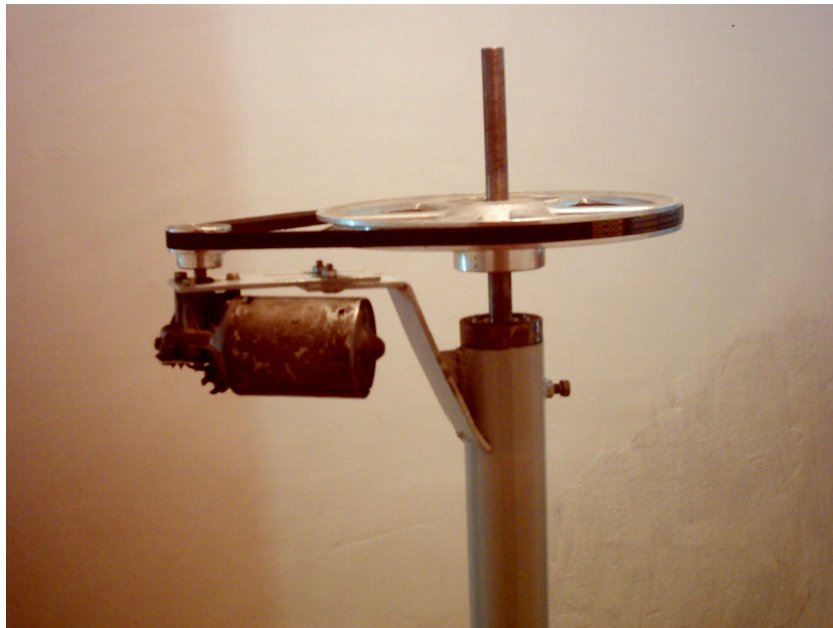


Figura 5.4 Detalhes do motor, polias e correia.

Também se observa na Figura 4.4 o braço de sustentação do motor elétrico que é soldado diretamente no tubo vertical de montagem de todo o sistema de seguimento. Este braço possui uma peça móvel que através de dois parafusos e porcas, faz o ajuste de tensão da correia.

A Figura 5.5 apresenta detalhes do eixo horizontal já fixado ao vertical, o qual irá sustentar os dois módulos fotovoltaicos através de um conjunto de quatro perfis tipo cantoneira e presos com presilhas de fixação; as mesmas podem movimentar-se para um perfeito ajuste, podendo ser fixadas por porcas para não haver mais movimento.

Os perfis de ajuste da largura dos módulos também podem ser movidos para após serem fixados, ficando estáticos. Neste conjunto também é ajustada a elevação dos painéis em relação ao Sol, levando em consideração a latitude local e a estação do ano, este ajuste é feito na peça de fixação do eixo horizontal ao vertical conforme a figura 5.5.

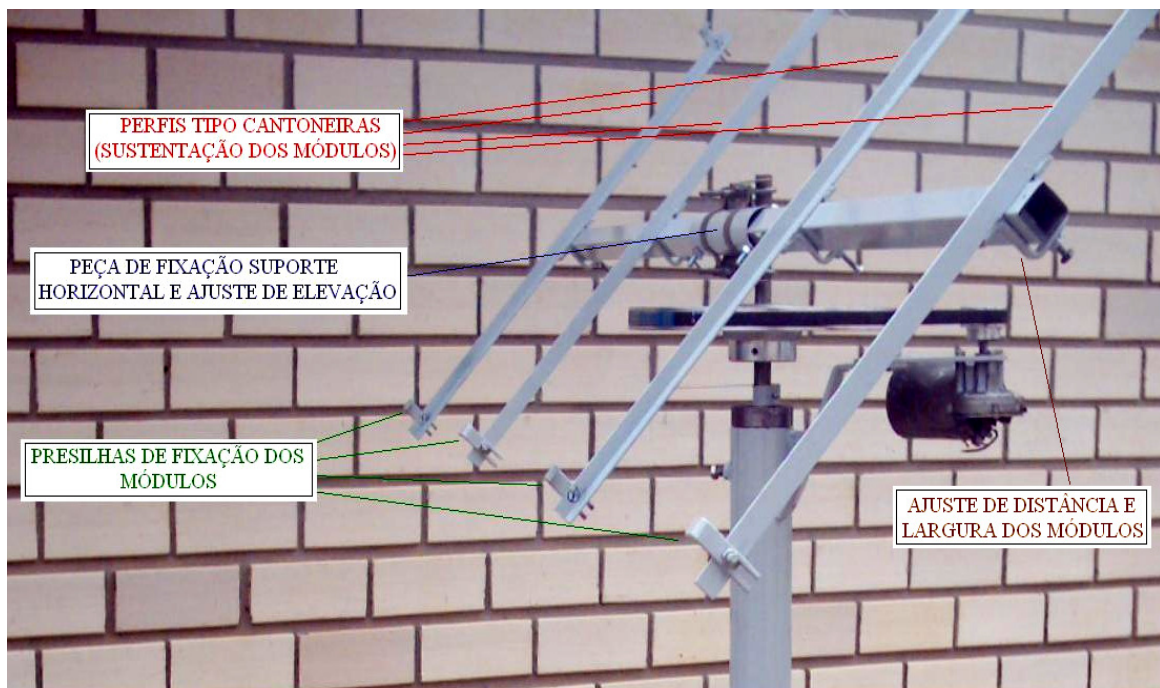


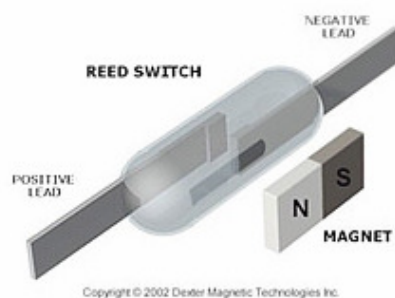
Figura 5.5 Eixo horizontal e suportes para módulos fotovoltaicos, já fixados no eixo vertical.

5.2 Eletrônica

O sistema de controle eletrônico do seguidor usa um micro-controlador (será chamado μC) da família 8051 (ler Apêndice II), descrito por vários autores [Silva Jr., 1990; Gimenez, 2002], que faz o gerenciamento de todas as funções do sistema. Com isto, a implementação do circuito torna-se confiável, simples e de baixo custo. As funções controladas são:

- Sensoriamento de posição dos painéis (leste, ½ dia e oeste), início e fim de curso.
- Sensoriamento de luz do dia e noite; controle anti-relâmpago (clarão - luz falsa).
- Sensoriamento de posição dos painéis em frente ao Sol.
- Controle do motor e reversão de sentido do mesmo (leste-oeste, oeste-leste).
- Não movimentação do sistema em períodos do dia com céu nublado (ausência de radiação direta). Pode ser programado para aguardar algumas horas e após se posicionar na posição ½ dia.
- Rotina de ajuda para ajuste de sensores magnético e óptico.
- Rotinas de temporização.

O equipamento usa três sensores magnéticos do tipo *reed switch*, que determinam, através de ajuste prévio, a posição leste, meio-dia e oeste e um sensor óptico (fototransistor) com haste de sombreamento para posicionar o conjunto em frente ao Sol. O mesmo sensor óptico com mudança de sua polarização pelo μC determina se é dia e se o índice de radiação é satisfatório. Na Figura 5.6 observam-se os sensores mencionados.



a) Sensor Magnético



b) Sensor óptico

TIL-78

Figura 5.6 Sensor magnético e óptico.

O *reed switch* é uma chave tipo liga-desliga que funciona com a presença de um campo magnético. Neste projeto usa-se um sensor do tipo normalmente aberto (desligado) e quando se aproxima um ímã ele fecha o contato (liga) gerando um sinal que será analisado e processado pelo μC .

O fototransistor é um dispositivo semicondutor constituído basicamente de duas junções que podem ser PN-NP (PNP) ou NP-PN (NPN), o sensor usado é do tipo NPN. O

transistor contém normalmente três terminais (coletor, base e emissor), mas como o dispositivo utilizado é um fototransistor, possui apenas dois terminais, coletor e emissor. A base é uma janela onde incide a radiação luminosa, o que faz aumentar ou diminuir a corrente elétrica que flui entre coletor e emissor (corrente gerada externamente para polarização do circuito). Quanto mais potência radiante, maior a corrente que flui. Utiliza-se esta propriedade para os testes necessários, convertendo-se esta variação de corrente (função da iluminação) em tensão através de resistores adequados, que irão fornecer a sinalização para o μC . Na Figura 5.7 observam-se os sensores magnéticos e o conjunto óptico instalados no seguidor solar.



(a)



(b)

Figura 5.7 Sensores magnéticos (a) e conjunto óptico (b).

É importante destacar a atuação do conjunto sensor óptico e haste de sombreamento que determinam para o μC quando o conjunto de módulos está voltado para o Sol; neste

equipamento sempre que o seguidor se movimenta, o sensor óptico já foi usado pelo μC para determinar se é dia ou noite e se a radiação é forte. Quando o seguidor solar posicionar os módulos fotovoltaicos em frente ao Sol, a haste de sombreamento do conjunto óptico produz sombra sobre o sensor, o que gera um sinal elétrico que o μC entende como posição ideal alcançada e comanda a parada do motor elétrico. Após um movimento, o sistema espera 15 minutos ($3,75^\circ$) até novo comando de posicionamento do conjunto (o ajuste de posicionamento é feito de 15 em 15 minutos).

A Figura 5.8 ilustra o efeito da haste de sombreamento sobre o sensor óptico. Como o movimento aparente do Sol é leste-oeste é necessário apenas um fototransistor, que também atende aos demais testes executados pelo μC . Observe-se que o conjunto óptico é colocado no lado oeste do eixo horizontal.

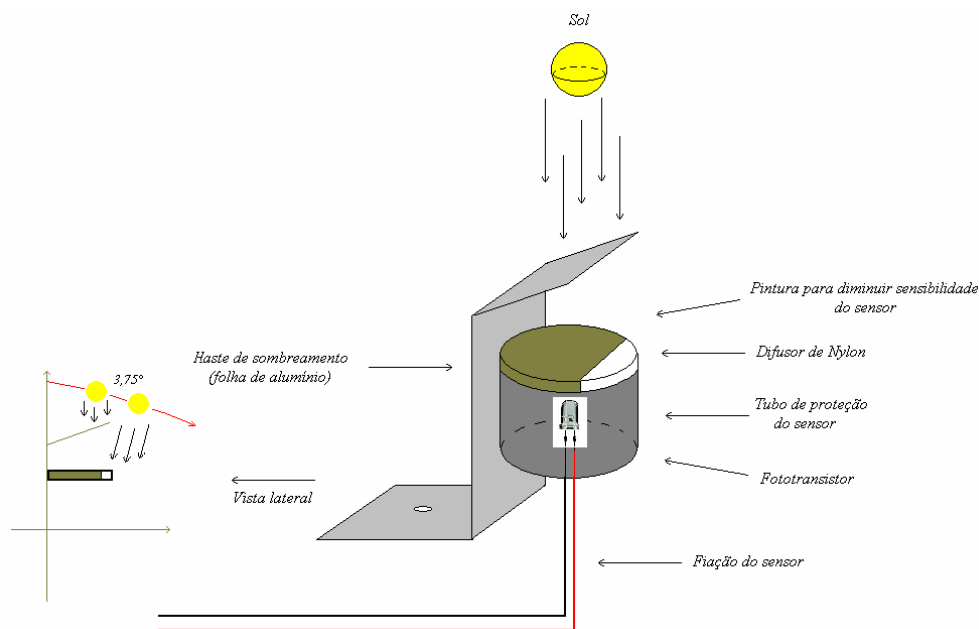


Figura 5.8 Haste de sombreamento e fototransistor.

O que torna este equipamento viável é sua mecânica simples e um sistema eletrônico de controle seguro. Sua implementação foi facilitada com o uso de um componente que é usado largamente em inúmeras aplicações tecnológicas (civis e militares), o micro-controlador (μC), também conhecido como computador de um só *chip* (circuito integrado único). É um circuito integrado que pode ser programado para atender funções específicas de pequenos ou grandes projetos de sistemas eletrônicos, este componente é programado pelo usuário com linguagem de máquina (*assembler*) específica do fabricante do componente ou com compilador de alto nível. Neste projeto foi usado um μC da ATMEL (fabricante) AT-89S52 que corresponde ao μC 8051

da INTEL, ou seja, responde ao *set* de instruções deste e possui o mesmo *hardware* interno. Este componente é extremamente confiável e de baixo custo. Também possui a tecnologia de memória interna (*flash*) para gravar as rotinas de programação para o seu funcionamento. O circuito eletrônico micro-controlado do seguidor solar e o programa de gerenciamento do mesmo foram desenvolvidos no Laboratório de Energia Solar.

Para a redução da velocidade do motor, além da relação de polias, foi implementado um circuito de controle eletrônico por largura de pulsos usando um circuito integrado do tipo 555. Este é um circuito que gera um sinal de onda quadrada com variação de sua frequência e largura de pulsos. Com este circuito e com uma etapa de controle de potência usando um transistor de tecnologia MOSFET para alta tensão e corrente (500 V-14 A), modelo IRFP450, foi obtida alimentação pulsada (efeito de uma chave liga-desliga rápida) para o motor de corrente contínua (impulsor). Com isso se reduziu a velocidade do mesmo para menos de 1 rpm. A reversão do motor é feita através de dois relés que mudam sua polarização, sendo todo o gerenciamento dos sinais feito pelo μC .

O motor elétrico usado como impulsor do sistema de seguimento é o modelo CHP da BOSCH (ref. 9390082052), com tensão nominal de 12V e corrente máxima de 3^a. Seu consumo é função do torque exigido pela máquina, sendo possível até 14 Nm. Este motor possui uma caixa de redução que fornece em seu eixo de movimento uma velocidade máxima de 40 rpm. Para obtenção de uma velocidade menor foi controlada a tensão de alimentação do motor e usado um sistema de polias, conforme descrito no item 5.1.

Na Figura 5.9 é visto o motor e curva característica para um modelo da mesma família de motorreductores da BOSCH.

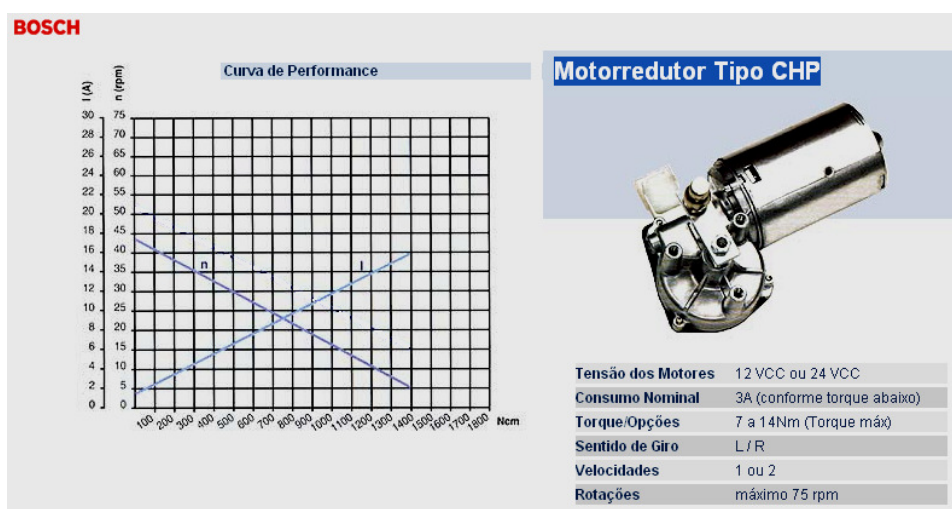


Figura 5.9 Motorreductor BOSCH e curva para um modelo da família CHP (modificada).

O circuito do seguidor solar tem proteção contra sobre-tensão e é alimentado diretamente através do sistema fotovoltaico autônomo.

No final de cada dia o sistema é posicionado na direção leste, e aguarda o amanhecer, para repetir o movimento de seguimento solar. Se ocorrer um dia nublado ou parcialmente nublado, o programa de controle identifica a situação e se posiciona na posição meio-dia, ou fica parado na posição que estiver, até haver radiação suficiente para o movimento do equipamento.

Na Figura 5.10, é apresentado o fluxograma principal do programa de controle do sistema de seguimento solar. As várias rotinas indicadas são pequenos programas (sub-rotinas) que compõem o conjunto de instruções do programa de controle.

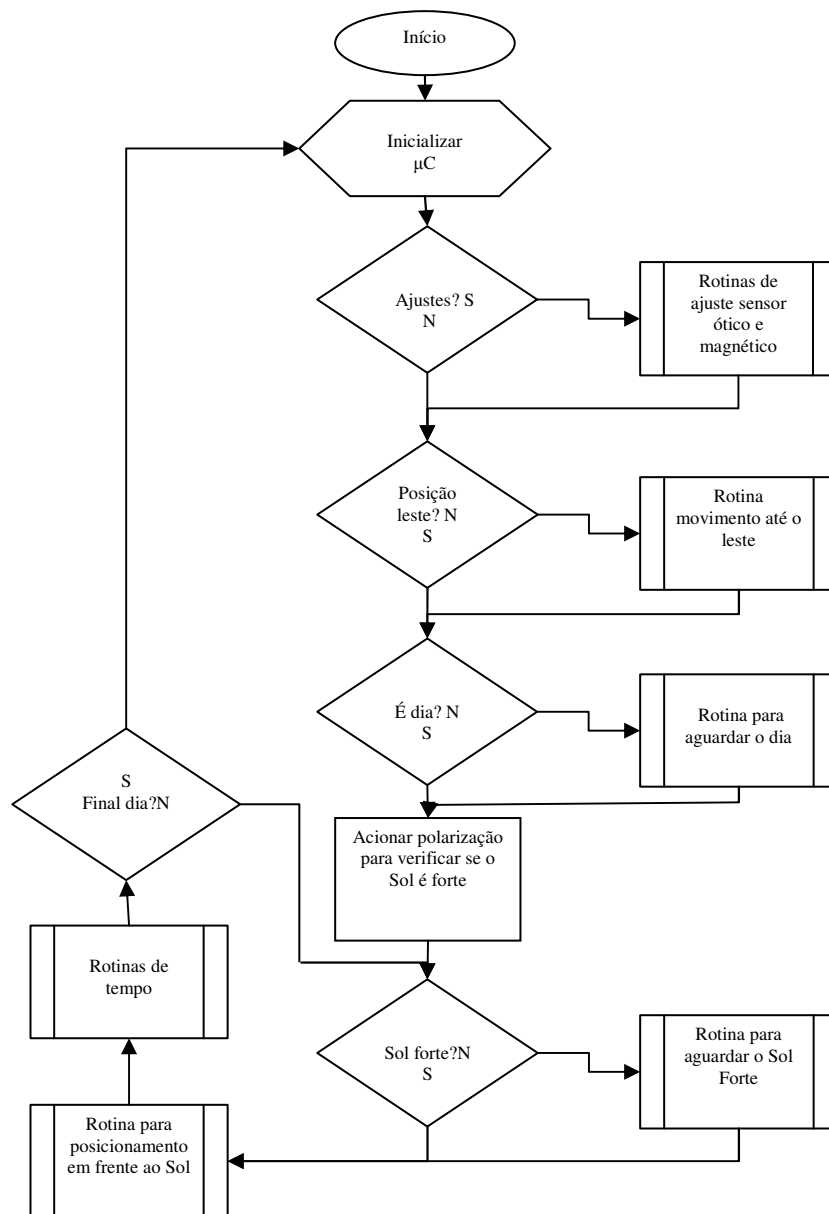


Figura 5.10 Fluxograma do programa de controle.

A Figura 5.11 mostra a máquina de seguimento solar instalada no Laboratório de Energia Solar da UFRGS com os módulos fotovoltaicos fixados. Também se observa a placa de referência fotovoltaica (à esquerda) para medir a irradiância sobre o conjunto e fiação dos sensores de temperatura e de controle do equipamento, a direita do braço de sustentação está instalado o sensor óptico com a haste de sombreamento.



Figura 5.11 Seguidor solar com módulos e sensores instalados.

A seqüência de Figuras 5.12 à 5.14, mostra o seguidor solar instalado junto ao prédio anexo do Laboratório de Energia Solar sem a fiação para a aquisição de dados do experimento. Em uma instalação de campo a placa de controle é protegida em uma caixa de plástico e fixada junto ao braço horizontal para ser protegida do Sol e de chuva pelos painéis fotovoltaicos. Somente um cabo de duas vias seria conectado ao conjunto de baterias e controlador de carga.



Figura 5.12 Seguidor solar com módulos instalados



Figura 5.13 Detalhe dos módulos e conjunto óptico.



Figura 5.14 Conjunto de módulos móvel e fixo.

Na Figura 5.14 se visualizam as duas montagens usadas no experimento, os módulos instalados no seguidor solar e os módulos instalados na estrutura fixa do telhado do prédio anexo do laboratório.

Na Figura 5.15 se observam detalhes dos *shunts*, circuito de controle do sistema, conjunto de lâmpadas usadas como carga para a corrente fotogerada que chega ao banco de baterias e conectores.



Figura 5.15 Placa de controle do sistema e carga com conjunto de lâmpadas.

5.3 Custos

O seguidor solar usado neste experimento tem como principais características a robustez e simplicidade de sua mecânica, eletrônica de controle baseada em um microcontrolador de baixo valor e facilidade de montagem e uso.

No experimento realizado foram instalados dois painéis fotovoltaicos no equipamento de seguimento solar, mas seu eixo horizontal pode receber até três módulos. A mesma estrutura eletro-mecânica pode suportar até quatro módulos se houver a troca do eixo de sustentação. O número de painéis que o seguidor pode sustentar é um item importante, pois terá forte influência no custo da energia gerada pelo conjunto fotovoltaico (maior eficiência) e na comparação de seu valor com outros equipamentos de mesmo porte.

Nos custos que serão apresentados, o desenvolvimento do programa de controle, circuito eletrônico e projeto mecânico não têm seus valores determinados por se tratar de um protótipo experimental com objetivo acadêmico.

Na Tabela 5.1 são relacionados os componentes utilizados para montagem do seguidor azimutal e seus valores; destacam-se: placa eletrônica, motor elétrico, tubos e perfis de aço, eixo de aço especial, conjunto de polias e rolamentos com vedação especial. Também é incluído o valor de serviços de tornearia mecânica, onde foram confeccionadas peças da máquina, soldagem e pintura.

Tabela 5.1 Componentes e custos

| Material (descrição) | Custo (R\$) |
|--|-------------|
| Placa eletrônica (protótipo) | 50,00 |
| Sensor ótico (fototransistor, difusor, haste de sombra) | 6,00 |
| Motor impulsor | 130,00 |
| tubos diversos, perfis de aço e eixo | 150,00 |
| Polias e rolamentos | 85,00 |
| Correia | 12,00 |
| Diversos (parafusos, porcas, etc.) | 27,00 |
| Torneiro Mecânico (eixo, soldagem, peças diversas, etc.) | 210,00 |
| Tinta, solvente e pintura | 30,00 |
| total | 700,00 |

Com esta tabela chega-se ao valor total do equipamento de seguimento solar R\$700,00, com um custo próximo a 44% do valor de um módulo fotovoltaico modelo KC85T da Kyocera (R\$ 1.570,00).

Uma comparação importante a ser feita é a do valor de um seguidor solar com características semelhantes ao usado no experimento. Os equipamentos de mesmo porte (até quatro painéis) são todos com valores cotados em seus países de origem, não incluídos impostos e valor de transporte, a Tabela 5.2 mostra o preço de cada equipamento de seguimento solar.

Tabela 5.2 Custos de seguidor solar até 4m² de módulos

| Seguidor (modelo) | Custo (R\$) | Custo | Moeda | País |
|----------------------|---|---------|-------|-----------|
| Experimental (UFRGS) | 700,00 | 700,00 | Real | Brasil |
| Lorentz Active 400 | 1331,95 | 503,00 | EURO | Alemanha |
| Davy Solatraka LD6 | 2448,00 | 1400,00 | DÓLAR | Austrália |
| Wattsun TR-55 | 2031,50 | 1195,00 | DÓLAR | EUA |
| Fontes : | http://www.solazone.com.au/tracker.htm | | | |
| | http://www.partsonsale.com/wattsuntrakerprice.pdf | | | |
| | http://revez-solar.com/ | | | |
| | http://www.lorenz.de/ongrid/en/contact/address | | | |

Conforme a Tabela 5.2, os preços dos equipamentos variam muito devido às características de cada modelo. Alguns fabricantes dão garantias de até 10 anos, outros equipamentos suportam até seis módulos (LD6), mas todos com movimento em um eixo (correção do azimute) e ajuste de elevação manual. O seguidor azimutal desenvolvido no Laboratório de Energia Solar ficou com um custo de R\$700,00. Para uma melhor comparação com os outros equipamentos é necessário compatibilizar a vida útil do seguidor com a dos módulos. Para isso será usado o tempo de garantia dos módulos, em torno de 25 anos, assim serão acrescentadas aos custos do seguidor seis manutenções preventivas conforme Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Custos de seis manutenções preventivas

| | Placa controle (R\$) | Sensor óptico (R\$) | Correia (R\$) | Diversos (R\$) | Subtotal (R\$) |
|------------------------|----------------------|---------------------|---------------|----------------|----------------|
| Manutenção 1 (04 anos) | | 6,00 | 12,00 | 20,00 | 38,00 |
| Manutenção 2 (08 anos) | 50,00 | 6,00 | 12,00 | 20,00 | 88,00 |
| Manutenção 3 (12 anos) | | 6,00 | 12,00 | 20,00 | 38,00 |
| Manutenção 4 (16 anos) | 50,00 | 6,00 | 12,00 | 20,00 | 88,00 |
| Manutenção 5 (20 anos) | | 6,00 | 12,00 | 20,00 | 38,00 |
| Manutenção 6 (24 anos) | 50,00 | 6,00 | 12,00 | 20,00 | 88,00 |
| Total (R\$) | | | | | 378,00 |

Com isto se chega a um valor total para o seguidor azimutal de R\$ 1.078,00, as manutenções por serem simples poderão ser feitas pelo próprio usuário do sistema. Não foi considerado o desgaste de peças e estrutura metálica por corrosão, este problema mereceria um estudo especial em aplicações comerciais.

6. METODOLOGIA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo é apresentada a metodologia empregada para efetuar as medições de radiação global e irradiância no conjunto de painéis fotovoltaicos fixo e móvel, tensão no conjunto de baterias e corrente fotografada pelos conjuntos de painéis em estudo. Também foi feita a medição de temperatura nos módulos e nas células de referência. O objetivo é determinar através da análise de dados coletados pelo conjunto de sensores o aumento de rendimento (ganho energético) de um sistema de seguimento azimutal com inclinação fixa e igual à latitude local, em relação a um sistema fixo com orientação norte (hemisfério sul) e com a mesma inclinação.

6.1 Montagem do experimento

Foi montado um sistema de aquisição de dados usando a unidade de chaveamento modelo HP 34970A (*Data Acquisition/Switch Unit*), que faz a varredura e a leitura de todos os sensores e instrumentos empregados neste experimento. O armazenamento e gerenciamento do sistema são feitos por um computador pessoal (PC) e o *software* utilizado é o HP *BenchLink Data Logger*.

Na Tabela 6.1 são descritos os sensores e equipamentos utilizados na aquisição das informações.

Tabela 6.1 Características de equipamentos e sensores.

| Equipamento | Grandeza | Escala | Exatidão |
|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|
| HP 34970A | Tensão | 100mV | $\pm(0,005\%+0,035\%)$ |
| HP 34970A | Tensão | 1V | $\pm(0,004\%+0,0007\%)$ |
| HP 34970A | Tensão | 10V | $\pm(0,0035\%+0,0005\%)$ |
| HP 34970A | Tensão | 100V | $\pm(0,0045\%+0,0006\%)$ |
| Piranômetro Kipp & Zonen | Radiação Global | 1000 Wm ⁻² | $(\pm 30)Wm^{-2}$ |
| Sensor PT100 | Temperatura | | $\pm 0,3^{\circ}C$ |
| Shunt H&B (20A, 300mV) | Corrente | 20A | $\pm 0,5\%$ |
| Shunt H&B (30A, 150mV) | Corrente | 30A | $\pm 0,5\%$ |
| Células de Referência (CIEMAT) | Intensidade de radiação | 1000 Wm ⁻² | $(\pm 32)Wm^{-2}$ |

Obs.: nas linhas de leitura de tensão a exatidão informa $\pm(\text{leitura}\% + \text{fundo de escala}\%)$

A montagem em paralelo do conjunto de módulos fotovoltaicos, móvel e fixo e as ligações dos equipamentos, sensores, cargas (lâmpadas L1 à L5), sistema de aquisição e gerenciamento bem como o fluxo de informações coletadas é visto na Figura 6.1.

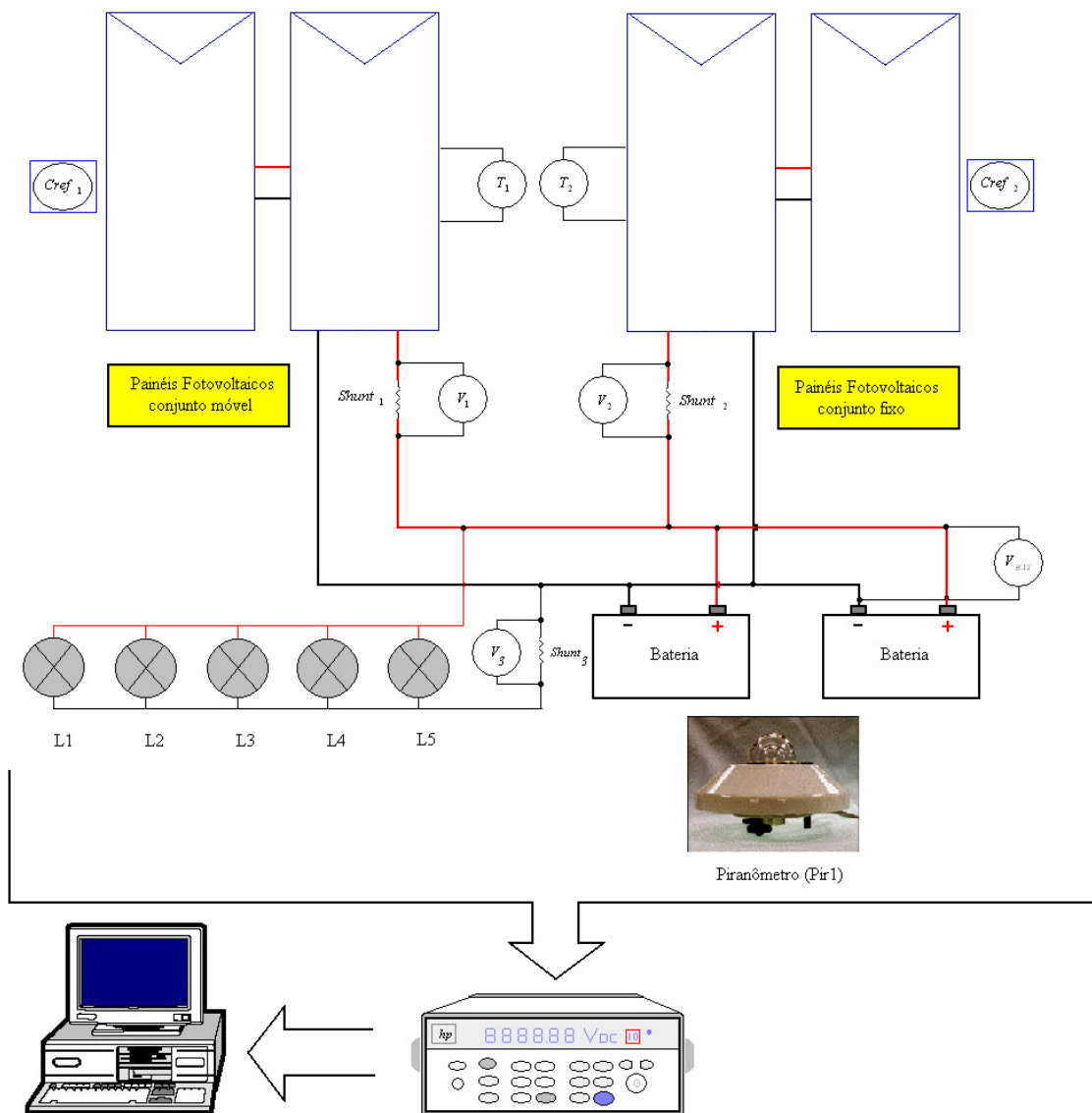


Figura 6.1 Detalhes da montagem do experimento.

O modelo dos módulos fotovoltaicos utilizados é KC85T da Kyocera. Foram montados dois conjuntos com dois módulos cada (em paralelo). O conjunto fixo foi instalado no prédio anexo ao Laboratório de Energia Solar, com inclinação de 30° , direção norte. O outro conjunto foi instalado no seguidor azimutal desenvolvido para este trabalho com a mesma inclinação. As características deste modelo de módulo são especificadas na Tabela 6.2, os valores elétricos são para uma massa de ar de 1.5 (AM), temperatura da célula de 25°C e irradiação de 1000Wm^{-2} .

Tabela 6.2 Características nominais do módulo KC85T.

| | |
|---|------------|
| Potência máxima ($P_{m\acute{a}x}$) | 87 Watts |
| Tensão de máxima potência ($V_{m\acute{a}x}$) | 17,4 Volts |
| Corrente de máxima potência ($I_{m\acute{a}x}$) | 5,02 Amper |
| Tensão de circuito aberto (V_{oc}) | 21,7 Volts |
| Corrente de curto circuito (I_{sc}) | 5,34 Amper |

(Fonte: http://kyocerasolar.com.br/site/pdfs/KC85T_br.pdf)

Os sensores de temperatura foram fixados a um módulo de cada conjunto fotovoltaico para correções (se necessário) nas medidas de tensão e corrente gerada pelos mesmos. As células de referência foram instaladas nos dois conjuntos (fixo e com seguimento), ambas com inclinação de 30° e sensores de temperatura para correção das leituras de irradiância. O piranômetro foi instalado na posição horizontal ao lado do conjunto fixo. Os shunts foram instalados para medir a corrente fotogerada pelo conjunto fixo e móvel, individualmente. Também foi medida a corrente elétrica consumida pelas cargas utilizadas.

A polarização dos módulos foi determinada por um conjunto de baterias em paralelo, o que garantiu uma tensão de operação entre 12,5 e 14V. O controle de carga foi feito através de cinco lâmpadas de 12V e 40W (cada unidade) em paralelo, ligadas durante o dia. No período da noite uma carga de 12V e 25W ficava conectada para a descarga parcial da energia excedente acumulada durante o período diurno. Outra fonte de baixo consumo é a placa de controle do seguidor que sempre está ligada (12V-50mA).

Com esta montagem foi obtido o total de corrente gerada pelo sistema fixo e móvel em cada dia de medição; a análise dos dados é apresentada nos próximos itens.

6.1.1 Observações sobre os instrumentos e sensores

O equipamento de aquisição de dados utilizado é o HP34970A, fabricado pela Hewlett Packard, onde uma placa multiplexadora de 16 canais do mesmo fabricante foi conectada a este para fazer a leitura de todos os sensores e instrumentos de medição utilizados. Para medida da irradiância global horizontal, foi utilizado um piranômetro Kipp & Zonen modelo CM11, com sensibilidade de 4,84 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$ e incerteza de $\pm 30 \text{ Wm}^{-2}$.

A tensão no sistema, e os valores de temperatura nas células de referência e módulos foram medidas diretamente pelo equipamento de dados através da placa multiplexadora, que

pode ser configurada para estas leituras sem a necessidade de *shunts* externos. Os sensores de temperatura utilizados foram do tipo PT100 com precisão de $\pm 0,3^\circ\text{C}$.

As células de referência foram utilizadas para medir a irradiância sobre os módulos do conjunto fixo e móvel, são células de silício monocristalino, sendo que a utilizada para o sistema fixo responde com 125mV para $1000\text{W}/\text{m}^2$ de irradiância, a do conjunto móvel responde com 124 mV para os mesmos $1000\text{W}/\text{m}^2$.

Os *shunts* de corrente são da marca Hartmann & Braun, foram usados para converter corrente em tensão elétrica para que o sistema de aquisição que apenas mede tensão elétrica efetuasse as medidas da corrente elétrica gerada pelos conjuntos móvel, fixo e o valor de corrente consumido pelas cargas de controle. Na Tabela 6.3 são mostradas as características de cada shunt utilizado.

Tabela 6.3 Características de cada shunt utilizado.

| | Característica | Precisão |
|--------------|----------------|----------|
| Shunt móvel | 20A-300mV | 0,5% |
| Shunt fixo | 30A-150mV | 0,5% |
| Shunt cargas | 30A-150mV | 0,5% |

O armazenamento dos dados coletados e comando de programação do equipamento de aquisição foram feitos por um microcomputador simples do tipo PC (*personal computer*), o software proprietário utilizado foi o *BenchLink Data Logger* da HP.

O seguidor solar foi o equipamento desenvolvido neste laboratório, conforme descrito no capítulo 5.

6.2 Análise de incertezas do experimento

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 R é uma função das variáveis independentes $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, ou seja:

$$R = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (6.1)$$

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

$$\Delta R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \Delta_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \Delta_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \Delta_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.2)$$

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.

6.2.1 Incerteza da irradiância global

Para incerteza da medida da irradiância global (G_{global}), foi considerada a incerteza associada ao piranômetro e ao instrumento de medida, este valor será chamado de ΔR_{global} , assim:

$$G_{global} = (G_{medido} \pm \Delta R_{global}) \text{ Wm}^{-2}$$

logo,

$$G_{global} = (G_{medido} \pm 30) \text{ Wm}^{-2}$$

6.2.2 Incerteza da irradiância nas células de referência

Para a estimativa da incerteza da irradiância medida pela célula de referência fixa e móvel será considerada a incerteza da própria célula de referência e do equipamento de medida, estes valor será chamado de ΔR_{cel} .

$$G_{fixa} = (G_{fixamed} \pm \Delta R_{cel}) \text{ Wm}^{-2}$$

$$G_{móvel} = (G_{móvelmed} \pm \Delta R_{cel}) \text{ Wm}^{-2}$$

assim,

$$G_{fixa} = G_{fixamed} \text{ Wm}^{-2} \pm 3,2\%$$

$$G_{móvel} = G_{móvelmed} \text{ Wm}^{-2} \pm 3,2\%$$

6.2.3 Incerteza da corrente elétrica medida

A corrente elétrica foi medida através de *shunts* (conforme tabela 6.3) colocados em série com a fiação positiva de cada conjunto fotovoltaico, o valor esperado de corrente fotogerada é de 10,04A para cada conjunto de módulos. Para a incerteza desta medição será considerado o instrumento de medida e *shunt* de cada conjunto. As incertezas serão denominadas de ΔI_{shfixo} ($I_{fixa} = (I_{fx} \pm \Delta I_{shfixo})A$) e $\Delta I_{shmóvel}$ ($I_{móvel} = (I_{mov} \pm \Delta I_{shmóvel})A$), para o *shunt* fixo e móvel respectivamente, a incerteza da soma das correntes será chamada de ΔI_{soma} .

$$I_{fixa} = (I_{fx})A \pm 0,5\%$$

$$I_{móvel} = (I_{mov})A \pm 0,5\%$$

Onde I_{fx} é a corrente elétrica medida no *shunt* fixo e I_{mov} no *shunt* móvel; I_{fixa} e $I_{móvel}$ são os valores da corrente elétrica de cada conjunto, fixo e móvel respectivamente, com a incerteza da medida.

Os valores calculados para um exemplo com corrente medida de 10,04A (dois módulos em paralelo) são:

$$I_{fixa} = (10,04 \pm 0,05)A$$

$$I_{móvel} = (10,04 \pm 0,05)A$$

incerteza da soma das correntes ($I_{soma} = (I_{móvel} + I_{fixa})A \pm 0,7\%$):

$$I_{soma} = (20,08 \pm 0,14)A$$

6.2.4 Incerteza da medida da tensão

Para incerteza da medida da tensão elétrica sobre o sistema, será considerada a incerteza do instrumento de medida e denominada de ΔV_{volt} (cálculo conforme manual da HP).

$$V_{sistema} = (V_{medida} \pm \Delta V_{volt})V$$

assim,

$$V_{sistema} = (V_{medida} \pm (0,0045\% \text{ leitura medida} + 0,0006\% FDE + 2 \cdot 10^{-5}))V$$

Exemplo: quando a tensão medida $V_{medida} = 13V$, escala do instrumento 100V:

$$V_{sistema} = (13 \pm (13 \cdot 0,0045\% + 100V \cdot 0,0006\% + 2 \cdot 10^{-5}))V$$

ou

$$V_{sistema} = (13 \pm 0,001205)V$$

a incerteza percentual da medida é de $\pm 9 \cdot 10^{-3} \%$, para o valor do exemplo, ou seja, muito pequena.

6.2.5 Incerteza da potência elétrica

Para potência elétrica, serão usados os valores de incerteza associados à medida da tensão do sistema e da corrente elétrica de cada *shunt* (móvel e fixo). Assim o valor de potência instantânea de cada conjunto de módulos ($P_{móvel}$ e P_{fixo}) será determinado com a incerteza associada através da equação (6.2). A incerteza para potência do conjunto móvel será denominada de $\Delta P_{móvel}$, para o conjunto fixo ΔP_{fixo} e a incerteza da soma das duas ΔP_{total} . A equação para determinar a potência elétrica instantânea é $P = V \cdot I_a$ (para o caso do exemplo $V = 13V$, $I_a = 10,04A$ e $\Delta V_{voltage} = 0,001205V$), como já foi determinada a incerteza para tensão e a corrente elétrica medida tem-se:

$$P_{móvel} = (P_{mov})W \pm 0,5\%$$

$$P_{fixa} = (P_{fx})W \pm 0,5\%$$

Para uma potência instantânea de 130,52W a incerteza será:

$$P_{móvel} = (P_{mov} \pm \Delta P_{móvel})W = (130,52 \pm 0,65)W$$

$$P_{fixa} = (P_{fx} \pm \Delta P_{fixa})W = (130,52 \pm 0,65)W$$

A soma das duas potências, incerteza percentual ($\Delta P_{total} = 0,7\%$):

$$P_{total} = (P_{móvel} + P_{fixa})W \pm 0,7\%$$

6.3 Dados obtidos experimentalmente

6.3.1 Aumento de rendimento teórico

Antes da análise dos dados obtidos, algumas considerações teóricas são necessárias: se uma superfície for instalada em um seguidor solar de dois eixos no topo da atmosfera (espaço), em uma latitude diferente da linha do equador, declinação solar igual a zero (equinócio de 21/03/2008, por exemplo), a irradiância extraterrestre normal (I_{on} em Wm^{-2}) pode ser calculada com o produto da constante solar (I_{sc}) pelo valor de correção de excentricidade da órbita terrestre (E_o), ou seja:

$$I_{on} = I_{sc} E_o \quad (6.3)$$

Com o seguimento do Sol durante todo este dia, a irradiância extraterrestre sempre estará normal à superfície, pois o ângulo de incidência direta para seguidor de dois eixos é $\cos \theta_s = 1$, conforme capítulo 2; se a irradiância for integrada pelo período deste dia (12 horas) obtém-se o total de irradiação, ou seja, com o produto de 12 horas por I_{on} é obtido o valor teórico de 100% de ganho de energia, como segue:

$$H_{o-dois} = I_{on} \frac{12}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta_s d\omega = 12 I_{on} \quad (6.4)$$

Se a mesma superfície ficar fixa, com inclinação igual à latitude ($\beta = \phi$) e direcionada para o pólo geográfico oposto ao hemisfério em que se encontra, o total de irradiação será proporcional ao co-seno do ângulo de incidência direta (ver equação 3.19), para estas condições, a integral do período $-\pi/2$ a $\pi/2$ será:

$$H_{o\text{-fixa}} = I_{on} \frac{12}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta_s d\omega = I_{on} \frac{12}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \omega d\omega = 7,64 I_{on} \quad (6.5)$$

após resolver esta integral chega-se ao valor para irradiação fixa ($H_{o\text{-fixa}}$) de 7,64 por I_{on} . O ganho teórico do sistema de seguimento sobre o fixo seria de 57%, conforme a equação 6.6.

$$Ganho = \left[\left[\left(\frac{12 I_{on}}{7,64 I_{on}} \right) - 1 \right] 100 \right] \% \quad (6.6)$$

O aumento teórico de rendimento foi calculado usando um sistema de seguimento de dois eixos. O sistema usado neste trabalho é um seguidor azimutal já descrito no capítulo 2, o ganho será maior que o fixo e menor que o sistema de dois eixos ($H_{o\text{-fixa}} < H_{o\text{-azim}} < H_{o\text{-dois}}$). O sistema de seguimento azimutal apresenta para o ângulo de incidência direta a equação 2.11, assim a irradiação ($H_{o\text{-azim}}$) para o mesmo dia teórico, será determinada como segue:

$$H_{o\text{-azim}} = I_{on} \frac{12}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta_s d\omega = I_{on} \frac{12}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (\cos \beta \cos \theta_z + \text{sen} \beta \text{sen} \theta_z) d\omega \quad (6.7)$$

A solução numérica da Equação 6.7 resulta em uma constante de 10,35 horas por I_{on} , assumindo uma latitude de 30° , o que resulta em um ganho de 35,5% sobre o sistema fixo.

Os modelos teóricos de seguimento solar descritos determinam o ganho máximo que um sistema sem concentradores pode alcançar fora da atmosfera terrestre em relação a um sistema fixo, por um período de 12 horas de radiação solar em um dia teórico de equinócio. Esta comparação pode ser feita para sistemas instalados em qualquer local do globo terrestre, para qualquer data ou inclinação dos conjuntos.

Na figura 6.2 o gráfico com as curvas de cada modelo teórico citado acima para uma latitude de 30° .

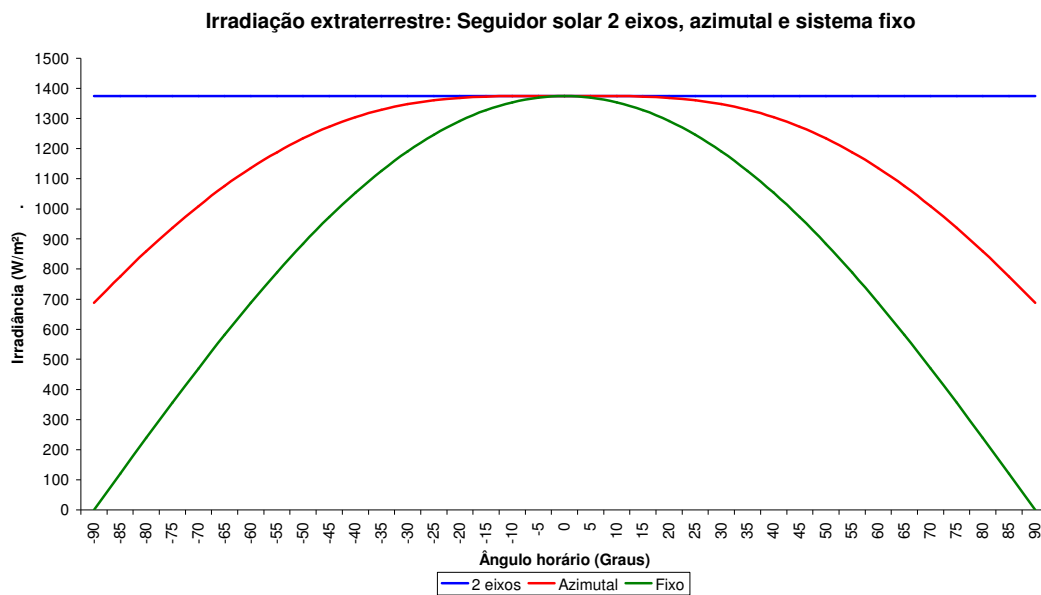


Figura 6.2 Curvas teóricas: seguimento solar com dois eixos, azimutal e fixa.

Fica claro pela visualização das curvas o aumento de rendimento de sistemas de energia solar com o uso de seguidores, principalmente o de dois eixos. O azimutal que é objeto deste trabalho tem destaque nos períodos do amanhecer até 11:00h da manhã e das 13:00h ao pôr-do-sol. Os valores teóricos de ganho servem para avaliar os cálculos e resultados encontrados no experimento.

A radiação solar que chega à superfície da Terra sofre grande atenuação através da massa atmosférica por processos de espalhamento e absorção; o índice de claridade horário (k_t) relaciona a irradiação global horizontal e a extraterrestre, conforme descrito no item 3.2 desta dissertação. Este índice é afetado principalmente pela nebulosidade local, ou seja, quanto menor for o seu valor, maior é a fração difusa (k_d).

As equações citadas no item 3.2 serão usadas para os cálculos neste capítulo, pois associam através do k_t valores de irradiação global horizontal a valores de irradiação sobre superfícies inclinadas na superfície terrestre (fixas e móveis). Também é possível estimar o aumento de rendimento de um sistema com seguimento solar sobre outro fixo.

O que será determinado no experimento é o valor da energia gerada em cada montagem fotovoltaica e calcular o ganho energético do conjunto com seguidor solar em relação ao conjunto fixo e também indicar os períodos do dia em que o seguimento alcança maior rendimento em relação ao fixo.

6.3.2 Dados experimentais

No período de 18/02/2008 a 07/03/2008, foram coletadas pelo sistema descrito acima, informações sobre a radiação global, irradiância sobre o conjunto de módulos fixos e móveis, a quantidade de corrente elétrica fotogerada por cada conjunto e a tensão sobre o conjunto de baterias. Com os valores das medições, foi determinada a produção energética de cada conjunto de módulos fotovoltaicos e elaborado os gráficos necessários para este trabalho.

Este intervalo de tempo se caracterizou por dias parcialmente nublado a nublado com chuvas, com isto se conseguiu verificar o perfeito funcionamento do seguidor azimutal mesmo em dias de pouca radiação solar direta.

Com os dados coletados foi possível verificar o aumento de produção energética mesmo em dias não favoráveis ao sistema azimutal. Em dias de grande visibilidade, o aumento de rendimento foi o esperado por cálculos teóricos, conforme será verificado e comparado nos subitens que seguem.

6.3.3 Curvas de irradiância e radiação global

Nas Figuras 6.3, 6.4 e 6.5 (todas com horário local nas abscissas) são apresentados os gráficos da radiação global horizontal medida pelo piranômetro e irradiância pelas células de referência móvel e fixa, ambas com inclinação de 30° conforme já foi descrito.

Os dias apresentaram uma grande variação do índice de transmitância atmosférica horária, mas o equipamento de seguimento solar se portou adequadamente e o algoritmo usado para o gerenciamento do sistema respondeu corretamente às situações adversas que podem ocorrer durante o período de um dia. O seguidor azimutal aumentou a captação da irradiância sobre o conjunto móvel, mesmo com nebulosidade, pois nos períodos de céu limpo conseguiu manter os módulos fotovoltaicos voltados para o Sol e desta forma incrementou a taxa de conversão elétrica com a maior incidência de radiação direta.

Na Figura 6.3 fica claro o funcionamento do seguidor solar mesmo com períodos de grande variação da radiação direta devidos à nebulosidade. Sobre o conjunto móvel, a quantidade de radiação foi 19% maior que no conjunto fixo e 25% em relação ao plano horizontal. Este aumento de rendimento se torna importante na utilização da energia solar.

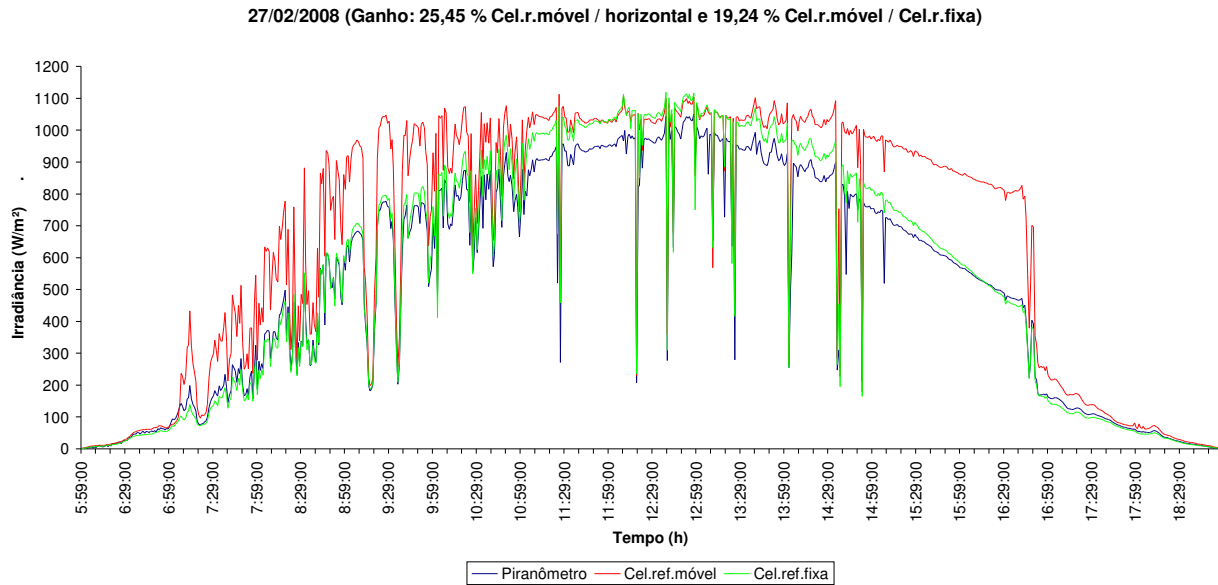


Figura 6.3 Comparação entre radiação global, irradiância conjunto móvel e fixo no dia 27/02/08.

No dia 04/03/2008 a nebulosidade foi bastante acentuada conforme a Figura 6.4 e novamente o comportamento do seguidor azimutal respondeu adequadamente às expectativas, pois mesmo com períodos de mais de 30 minutos sem radiação direta o seguidor fez o acompanhamento do Sol sempre que houve janelas de radiação capaz de sensibilizar o sensor óptico do equipamento. O seguimento aumentou o rendimento do conjunto móvel em 14,5% em relação ao fixo.

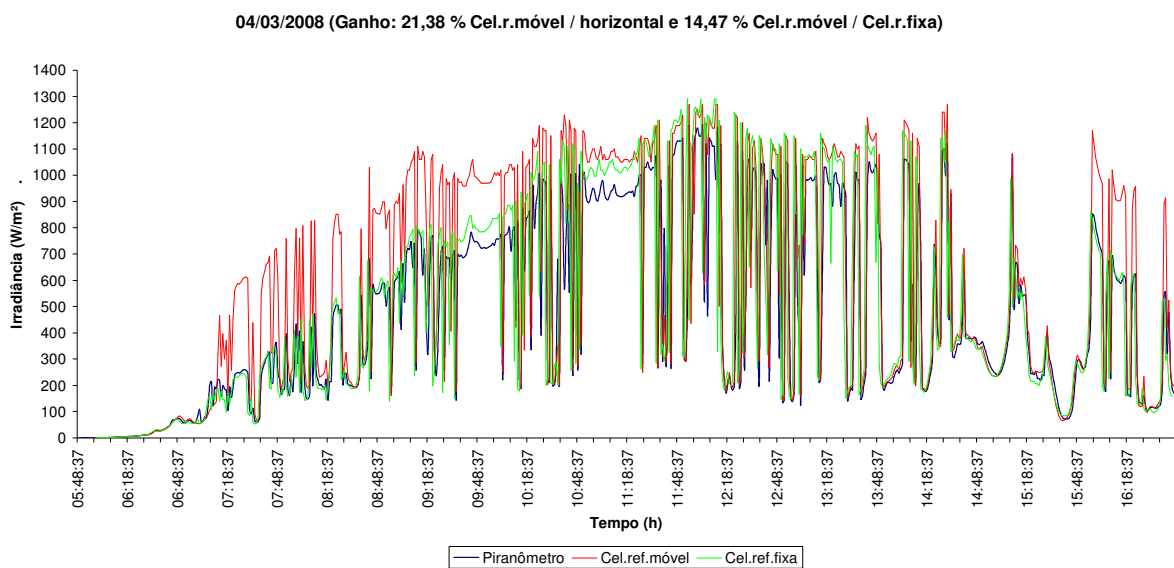


Figura 6.4 Comparação entre radiação global, irradiância conjunto móvel e fixo no dia 04/03.

A Figura 6.5 mostra o gráfico com as curvas do dia 07/03/2008 que foi um dos melhores dias no período em que foram efetuadas as medições no céu com poucas nuvens.

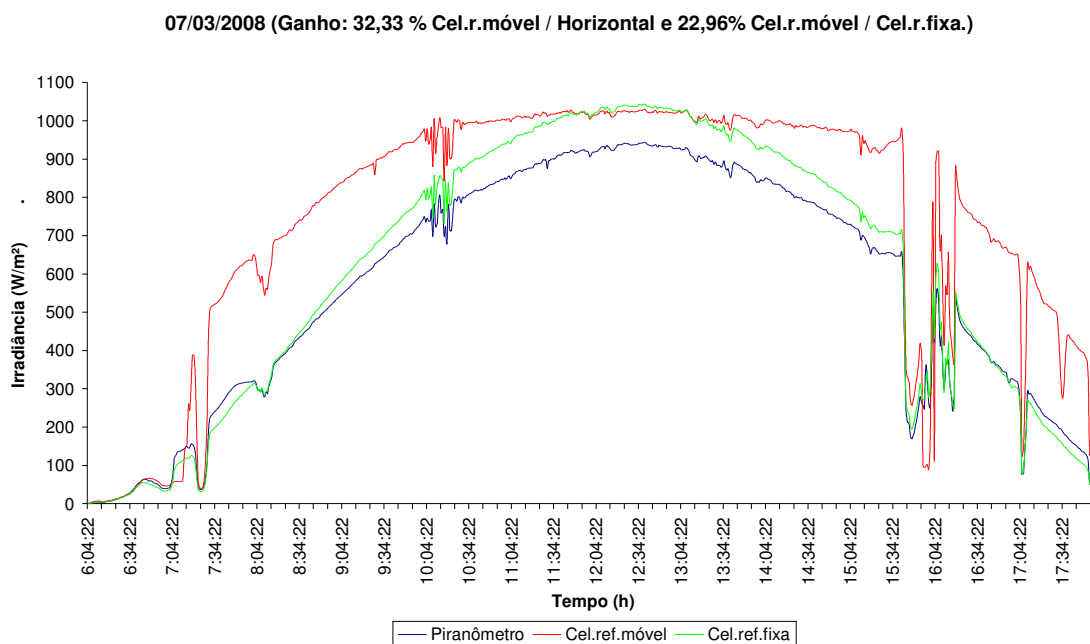


Figura 6.5 Comparação entre radiação global, irradiação conjunto móvel e fixo no dia 07/03/08.

Na figura é possível verificar o acentuado ganho do conjunto móvel sobre o fixo nos períodos da manhã (38%) e tarde (27,5%), conforme descrito na introdução teórica. O aumento do rendimento do sistema móvel foi importante para as condições atmosférica deste dia, pois chegaram a 23% em relação à instalação fixa e a 32% em relação à radiação global horizontal. Será feita a análise de geração energética nos períodos da manhã e tarde isoladamente, que em determinados tipos de aplicação e de demanda energética pode ser importante.

Os gráficos apresentados mostram a irradiação medida a cada minuto. O somatório dos valores de cada hora fornece o total de irradiação diária sobre cada conjunto e que teoricamente pode fornecer, junto com as características dos painéis fotovoltaicos utilizados no experimento, a energia gerada no final de cada dia. Com os valores medidos, serão validadas as seqüências de cálculos citadas no capítulo 3 itens 3.2 e 3.3. Após serão geradas as curvas teóricas e comparadas com as reais. Para esta análise serão usados os dados do dia 07/03/2008, quando ocorreu um dia com boa parcela de radiação direta sobre os conjuntos de conversão fotovoltaica.

Com o conjunto de equações já citadas, foram determinadas as parcelas de radiação difusa (considerada isotrópica) e direta (horizontal), a partir da radiação global medida pelo

piranômetro. Para isto foi determinado o valor do índice de transparência k_t horário e após com o modelo de Orgill et al., 1977, foi determinado o valor do índice de parcela difusa k_d horária. Deste modo foi possível chegar às outras componentes para uma superfície inclinada fixa ou com seguimento. Após foi utilizado o mesmo valor de k_d no modelo de Perez et al., 1987, para determinar a irradiação difusa e as demais componentes para uma superfície inclinada fixa ou em movimento.

Com o resultado dos dois modelos foram montados os gráficos com curvas de dados medidos e teóricos derivados da radiação global. O valor do ângulo horário (abscissas) está em graus e convertido em horário solar verdadeiro (equação 3.6).

Na Figura 6.6 é mostrado o gráfico com as curvas da radiação global, da superfície inclinada fixa e curva teórica gerada através do modelo Orgill. Na Figura 6.7 são mostradas as mesmas curvas e a teórica baseada no modelo de Perez.

As curvas teóricas representam a soma de todas as componentes obtidas pelos modelos (difusa, direta e refletida), os dois se comportaram satisfatoriamente, inclusive no segundo modelo (Figura 6.7) a curva teórica coincide em vários pontos com a curva medida da superfície inclinada.

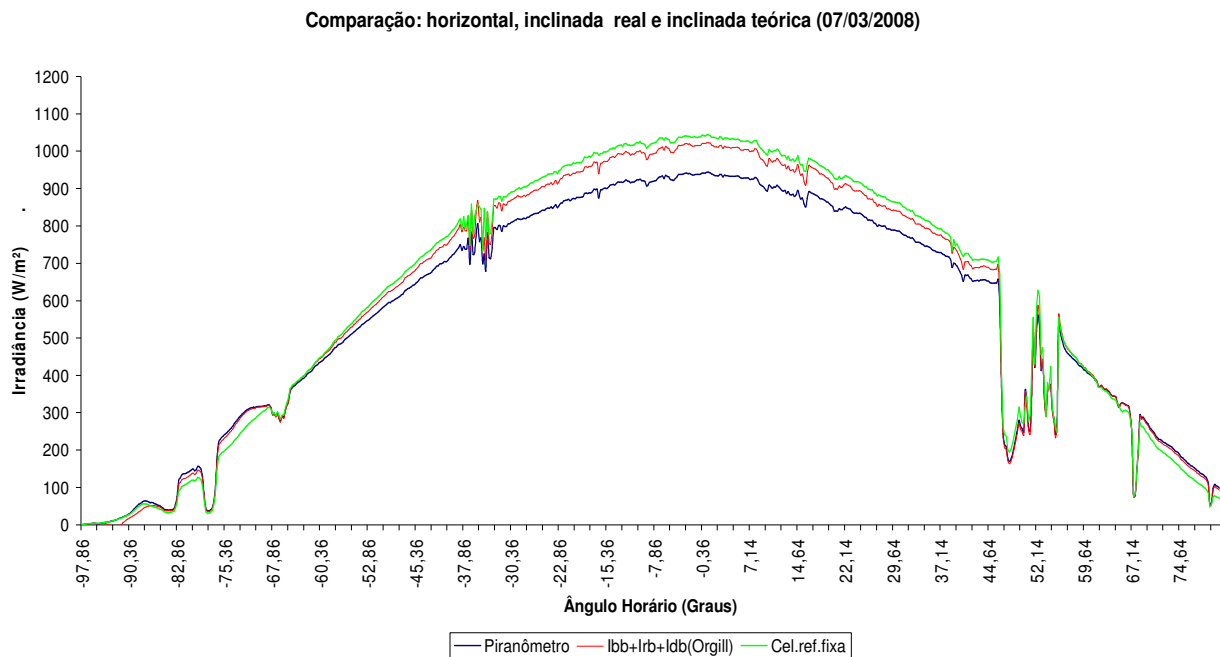


Figura 6.6 Curvas medidas (global e fixa) e teórica (Orgill).

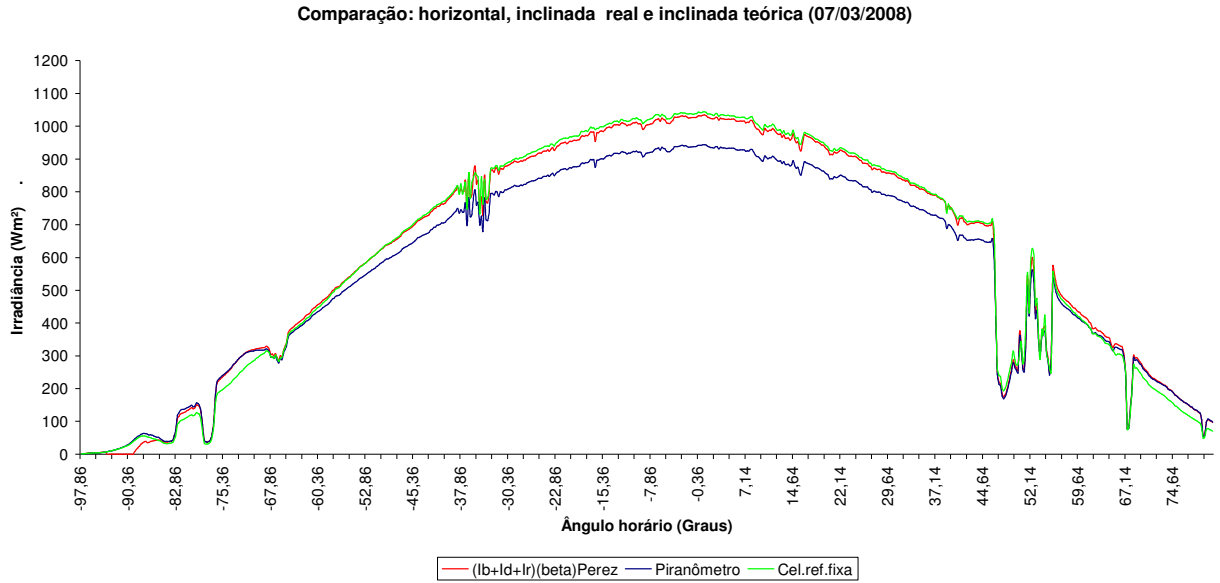


Figura 6.7 Curvas medidas (global e fixa) e teórica (Perez).

As Figuras 6.8 e 6.9 apresentam as curvas geradas para o seguimento azimutal utilizando o mesmo modelo isotrópico para obter a radiação difusa horizontal.

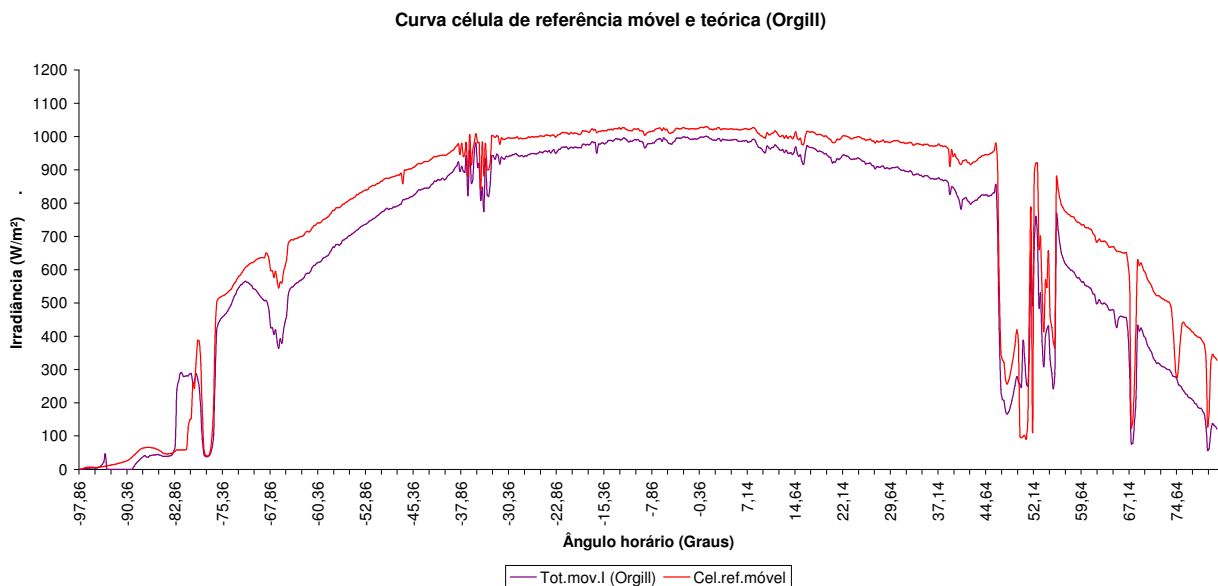


Figura 6.8 Comparação entre as irradiâncias obtidas com célula de referência móvel e teórica pelo modelo de Orgill.

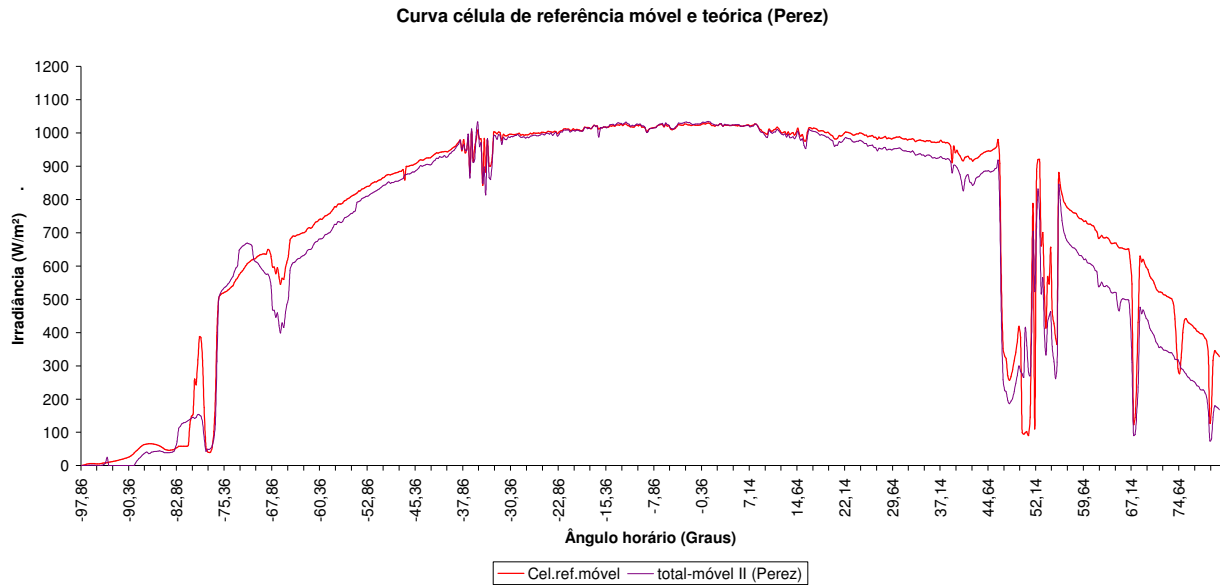


Figura 6.9 Comparação entre as irradiâncias obtidas com célula de referência móvel e teórica pelo modelo de Perez.

Para as curvas de seguimento azimutal o modelo Perez (total-móvel II) foi mais adequado, a diferença entre as curvas (real e teórica) se deve principalmente pela radiação direta incidente no conjunto móvel real. Do amanhecer até 11:00h e na parte da tarde das 13:00h ao pôr-do-sol esta diferença se destaca, pois o ângulo de incidência direta deste conjunto obedece à equação (2.11), enquanto a curva teórica é estimada a partir da radiação global, no período entre 11:00h e 13:00h estas curvas se aproximam bastante e tendem a se interceptar (o azimute local e solar do conjunto fixo tende a se igualar).

6.3.4 Curvas de potência elétrica

O objetivo do seguidor solar em um sistema fotovoltaico é aumentar a produção de energia elétrica, principalmente em dias com alta incidência de radiação direta.

Neste item será verificado o aumento de produção energética do sistema com seguimento solar em relação ao fixo. Este experimento não usou dispositivos de seguimento de ponto de máxima potência, foi escolhido um sistema autônomo simples, sem equipamentos sofisticados de controle.

No ensaio foi usado um conjunto de cargas resistivas para que as baterias não alcançassem sua plena carga, com isto o sistema sempre estava consumindo toda a corrente elétrica fotogerada. Através dos *shunts* foram medidas as correntes elétricas fornecida pelos dois

conjuntos. Com o produto da tensão elétrica da bateria versus a corrente elétrica se obtém a potência instantânea ($P=E.I_a$), integrando este produto pelo período total do tempo de produção dos módulos fotovoltaicos se determina a energia total fotogerada.

A Figura 6.10 apresenta o gráfico com as curvas da tensão da bateria, potência elétrica do conjunto móvel (C.móvel) e potência elétrica do conjunto fixo (C.fixo).

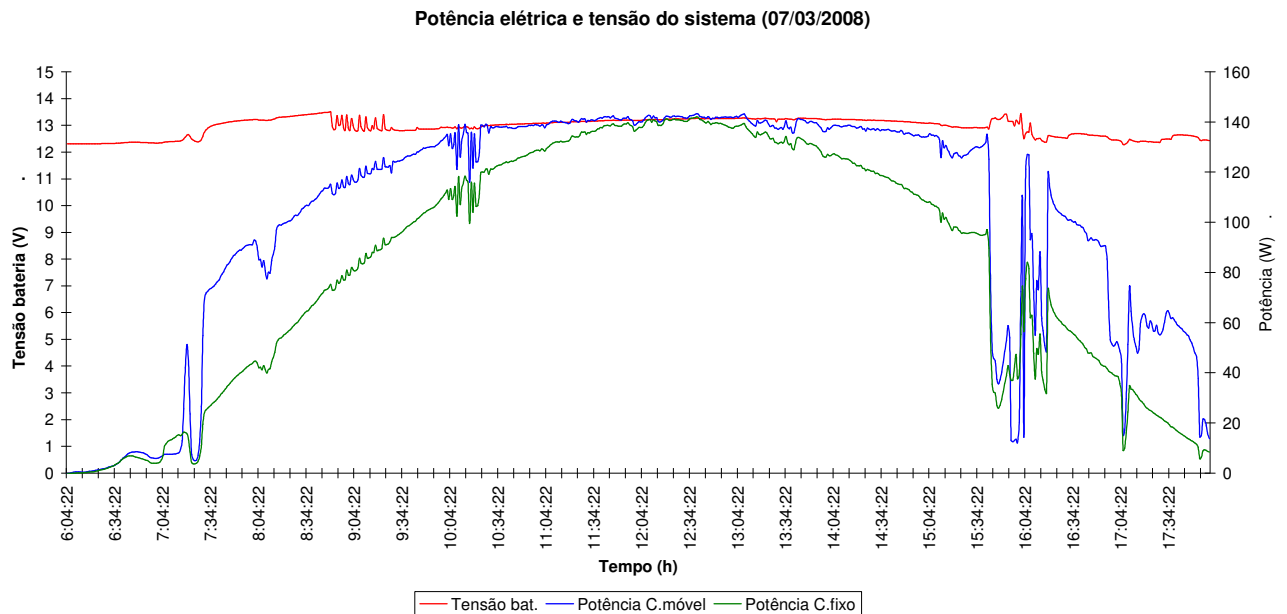


Figura 6.10 Gráfico das curvas de tensão da bateria e potência dos conjuntos.

Na Tabela 6.4 apresenta-se o cálculo de produção de energia para o dia 07/03/2008 dos dois conjuntos, também o percentual de ganho de potência elétrica gerada pelo móvel em relação ao fixo.

Tabela 6.4 Energia diária gerada pelo conjunto móvel e fixo (07/03/2008).

| | Energia diária | |
|----------------------------|----------------|--------|
| Conjunto Móvel (2 módulos) | 1214 | Wh/dia |
| Conjunto fixo (2 módulos) | 981 | Wh/dia |
| Total | 2195 | Wh/dia |
| Ganho (C.móvel/C.fixo) | 24 | % |

O valor percentual da energia gerada pelo conjunto móvel é 24% maior que o fixo (valor esperado), concordando com o gráfico de irradiação diária (Fig.6.5) o qual mostra um ganho de 23% do móvel em relação ao fixo. Se fossem usados quatro módulos fotovoltaicos em cada conjunto se obteria uma maior produção de energia, mas a diferença percentual se manteria a mesma, pois houve um aumento proporcional de painéis fotovoltaicos. A Tabela 6.5 mostra os valores de energia elétrica que seriam obtidos para estes novos conjuntos.

Tabela 6.5 Geração com quatro módulos fotovoltaicos em cada conjunto.

| | Energia diária | |
|----------------------------|----------------|--------|
| Conjunto Móvel (4 módulos) | 2428 | Wh/dia |
| Conjunto fixo (4 módulos) | 1963 | Wh/dia |

O conjunto fixo precisaria de mais um módulo para produzir a mesma quantidade de energia que o móvel, mas não se pode afirmar que a melhor solução é o uso de um seguidor solar. Esta análise depende de fatores como, total de irradiação diária, custos de implantação do sistema, manutenção, horário de maior demanda e outros itens.

6.3.5 Análise de energia gerada por períodos horários

Pelos gráficos apresentados anteriormente, o seguimento azimutal se destaca em ângulos horários do amanhecer até -15° e de 15° até o pôr-do-sol. Nestes períodos o coeficiente geométrico (R'_b) citado na equação (3.40) tende a ser alto, pois o conjunto móvel está voltado para o Sol, o que é determinante no cálculo da quantidade de irradiação sobre uma superfície inclinada móvel. Como a equação (2.11) do ângulo de incidência direta para o seguimento azimutal não depende do azimute ($\gamma_s = \gamma$), o fator geométrico será elevado nestes horários.

Para esta análise será usado o mesmo dia 07/03/2008. Nas Figuras 6.11, 6.12 e 6.13 são visualizados os gráficos de potência nos intervalos de tempo I, II e III, que representam os períodos do amanhecer até as 11:00h (-15°), central e das 13:00h (15°) ao pôr-do-sol respectivamente.

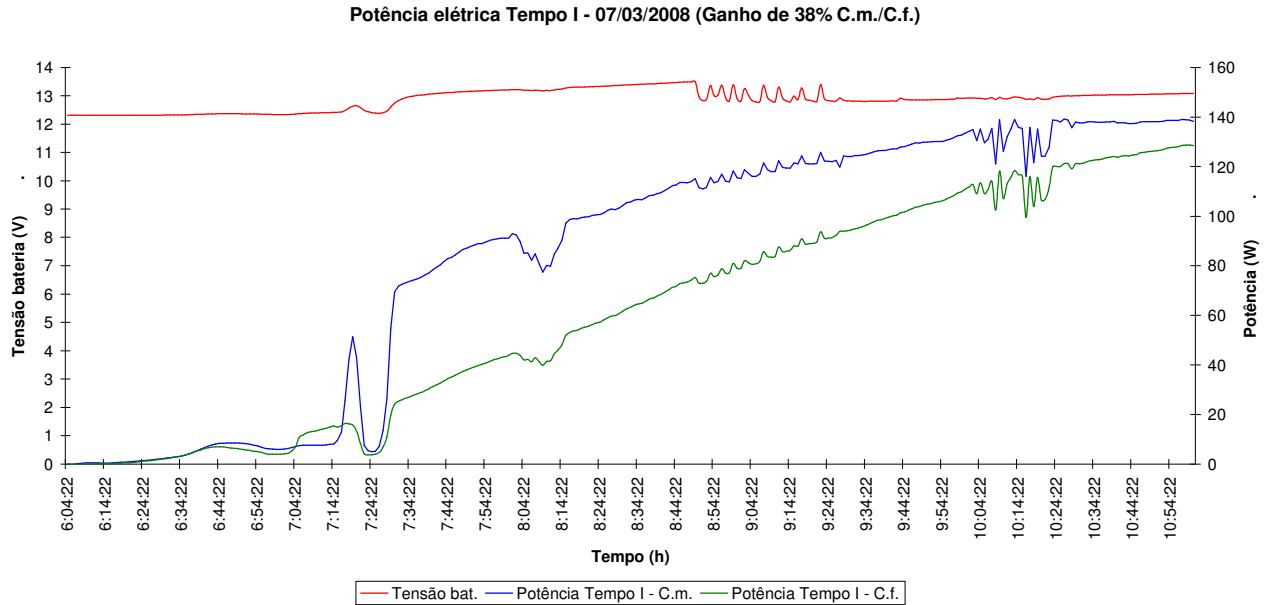


Figura 6.11 Potência e tensão no período do amanhecer até as 11:00h (-15°).

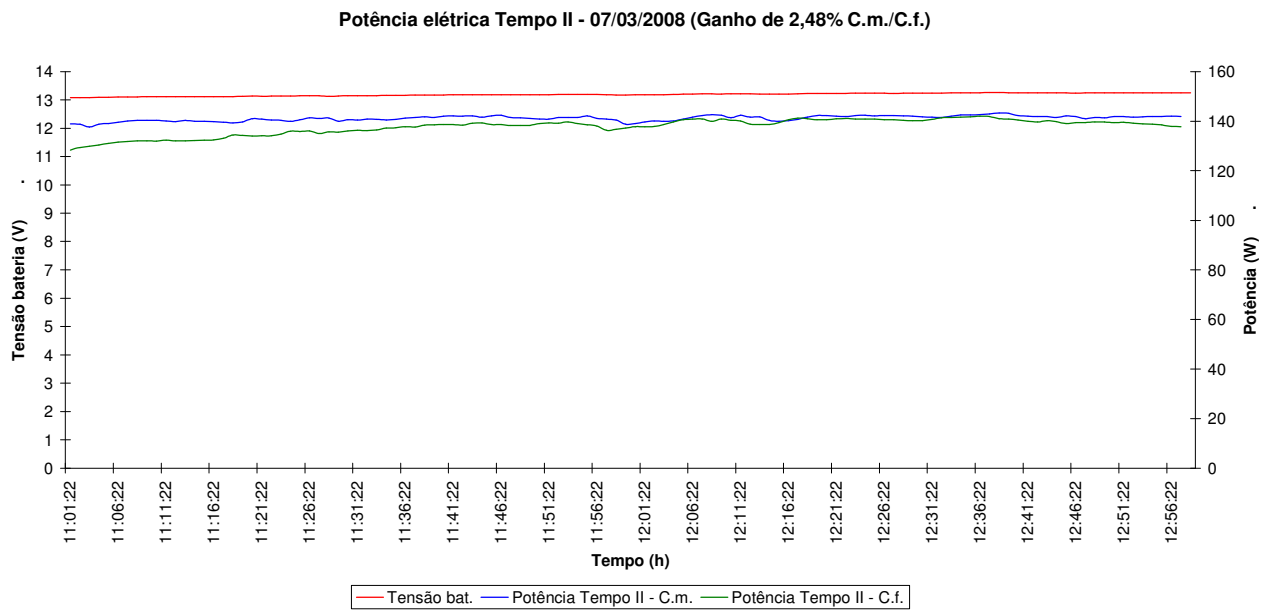


Figura 6.12 Potência e tensão no período central 11:00h até as 13:00h (-15° a 15°).

No período correspondente à Figura 6.11, o ganho de energia do sistema móvel em relação ao sistema fixo é de 38%, a energia total gerada no período foi de 721 Wh, que é a soma da energia gerada pelo conjunto móvel e fixo (419 Wh + 302 Wh).

O ganho de energia do sistema móvel sobre o fixo no período correspondente à Figura 6.12 foi de 2,5% e a energia total gerada foi de 553 Wh (280 Wh + 273 Wh).

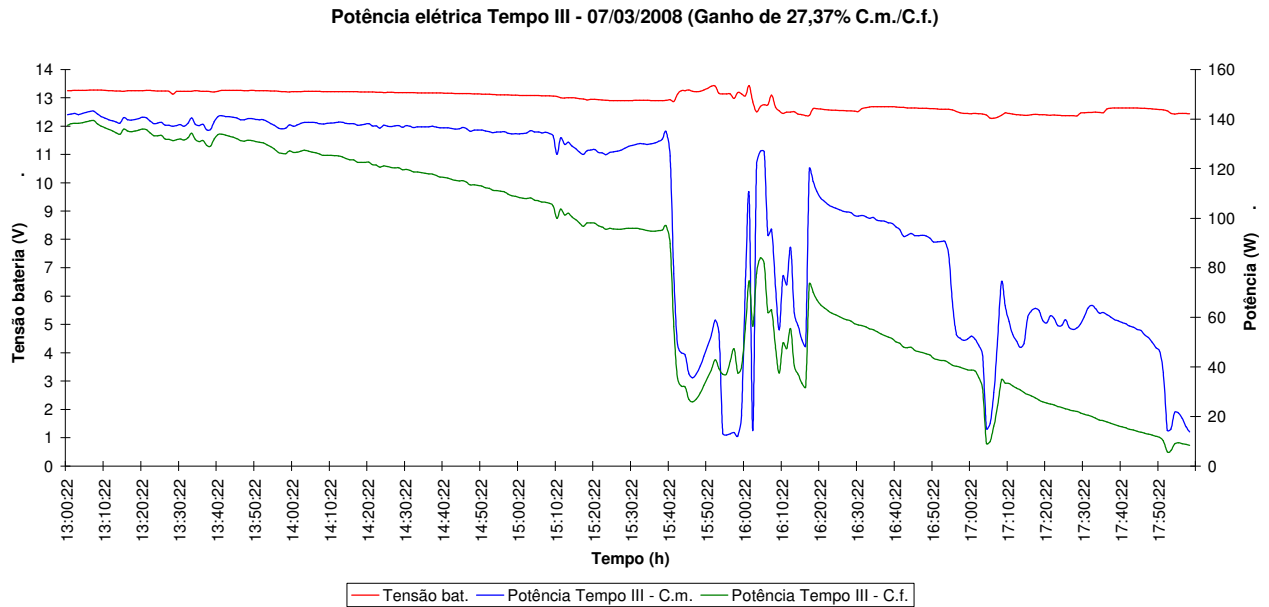


Figura 6.13 Potência e tensão no período das 13:00h (15°) até o pôr-do-sol.

Finalizando com o período da figura 3, onde o ganho foi de 27%%, a energia total foi de 921 Wh (516 Wh + 405 Wh).

A energia gerada no dia (a soma dos três períodos) é de 2,195 kWh/dia, valor esperado (conforme Tabela 6.4), mas os percentuais de aumento de rendimento nos diferentes períodos do dia em análise são importantes para projetos onde a maior demanda energética recaia sobre um destes, pois será um bom indicativo de uso de um seguidor solar ou acréscimo de mais painéis fotovoltaicos.

6.3.6 Análise de um dia desfavorável

Um dia totalmente desfavorável ao seguidor solar foi 28/02/2008, onde o dia foi nublado e com chuvas esparsas, mas houve pequenas janelas de radiação direta e o seguidor solar conseguiu corrigir o ângulo de azimute ($\gamma_s = \gamma$). Em um dia com predominância da radiação difusa, o sistema de seguimento solar não tem participação importante na produção energética. O sistema de sensoriamento e gerenciamento do seguidor, responderam com eficiência à radiação direta que houve em pequenos intervalos de tempo. Uma opção a ser implementada no sistema é a detecção de dias nublados ou chuvosos com pequenas parcelas de radiação direta, após, determinar se o balanceamento de energia é favorável à movimentação do seguidor solar ou não (um *software* e *hardware* mais complexo).

A Figura 6.14 mostra o gráfico do dia 28/02/2008, onde a irradiância do sistema móvel apresentou valores praticamente iguais ao fixo e ao horizontal.

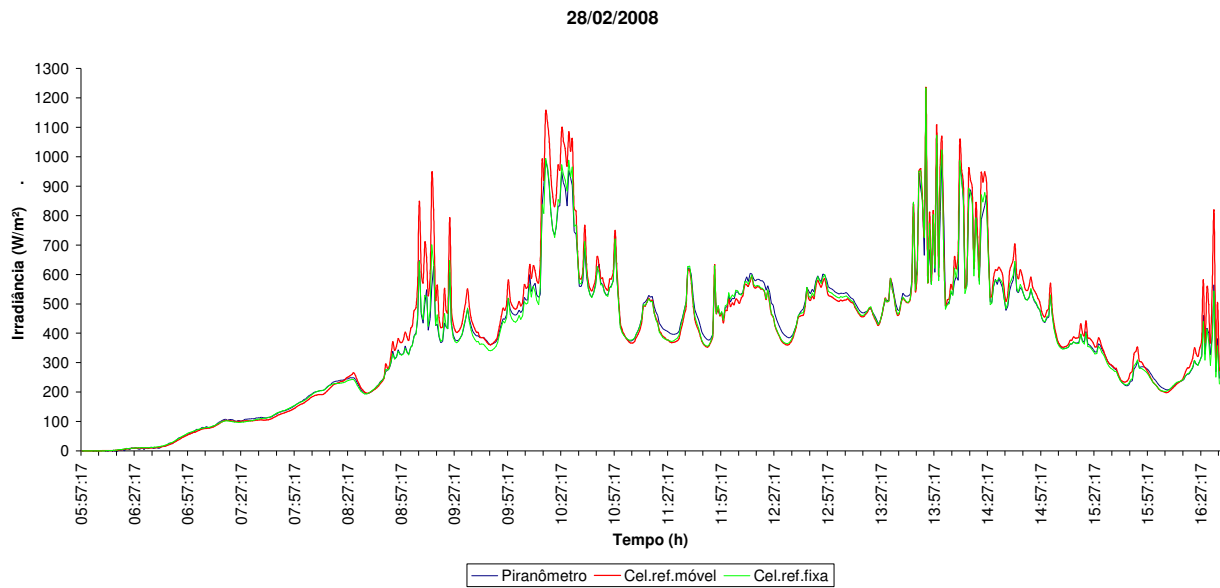


Figura 6.14 Comparação entre radiação global, irradiância conjunto móvel e fixo dia 28/02/08.

A produção energética deste dia foi de 1,17kWh/dia que representa a soma da energia gerada pelo conjunto móvel e fixo (602 Wh/dia + 569 Wh/dia). O conjunto móvel obteve um ganho de 5,8% em relação ao fixo. O gráfico com as curvas de potência e tensão da bateria para este dia são visualizadas na figura 6.15.

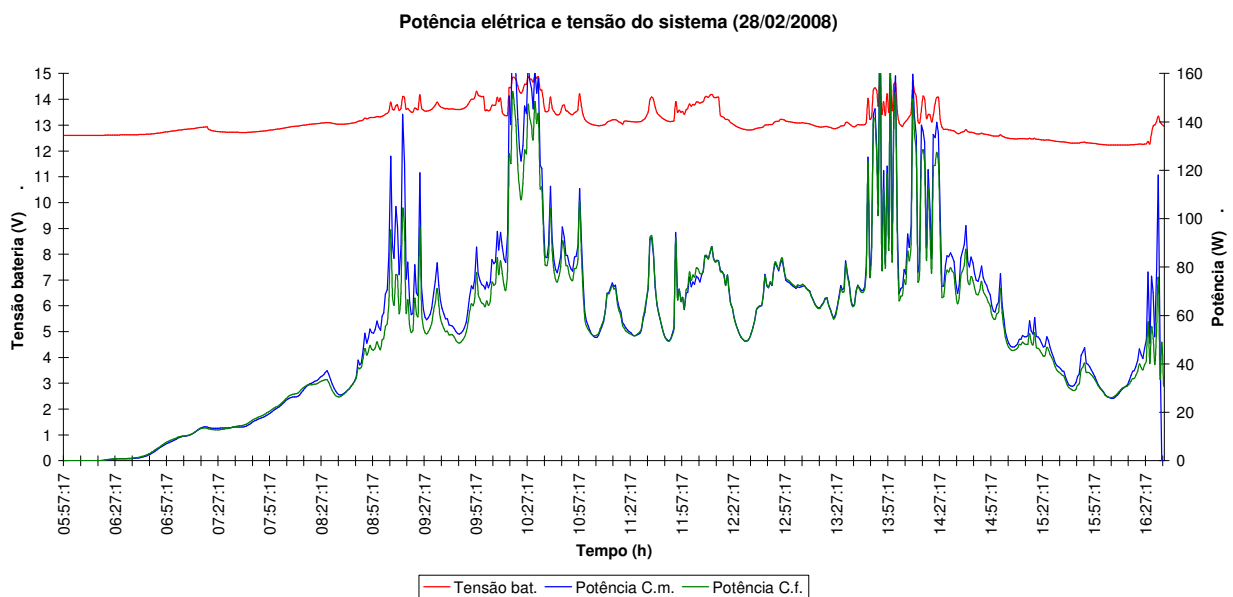


Figura 6.15 Gráfico das curvas de tensão da bateria, e potência dos conjuntos.

6.3.7 Irradiância anual (Porto Alegre): comparação de ganho energético de superfícies com seguimento azimutal em relação à fixa.

As medições do experimento foram realizadas em um curto período do ano (conforme item 6.3.2), mas foi possível verificar o correto funcionamento do seguidor azimutal desenvolvido no Laboratório de Energia Solar, o ganho energético do sistema móvel em relação ao fixo (principalmente em dias com alto índice de radiação direta) e a coerência no conjunto de equações escolhidas.

Para que os resultados não sejam limitados é interessante verificar o ganho da superfície com seguimento solar em relação à fixa para o período estimado de um ano. Também é interessante analisar o efeito da variação da inclinação da superfície móvel (5° em 5°) mantendo a inclinação da superfície fixa constante ($\beta = \phi$). Como resultado desta última análise seria possível verificar um melhor ângulo de incidência da radiação direta para aumentar a produção energética do conjunto móvel em relação ao fixo.

A implementação de uma simulação capaz de permitir as análises mencionadas necessita uma seqüência de dados horários de radiação solar. Para obter uma seqüência adequada de dados foi utilizado o programa computacional SeqMetBR [Krenzinger et al, 2004]. O programa sintetiza dados, em base horária, de radiação solar e temperatura ambiente para diferentes localidades do território brasileiro. Com os dados exportados pelo programa, foi criada uma planilha com a radiação horizontal global para os 365 dias do ano em Porto Alegre ($\phi = 30^\circ$). Estes valores foram utilizados na planilha de cálculo que determina a radiação sobre uma superfície inclinada fixa ou móvel e estimada a radiação anual sobre as mesmas. Na Tabela 6.6 é visualizado o ganho percentual mensal de energia solar incidente sobre uma superfície inclinada com seguimento, em relação à superfície fixa direcionada para o norte geográfico.

Tabela 6.6 Ganho energético mensal para diferentes inclinações da superfície (móvel) em relação à fixa (Porto Alegre).

| Ângulo de inclinação do sistema fixo 30° , seguidor azimutal (β°) - Porto Alegre | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| β° | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| Ganho (%) | | | | | | | | | |
| Dezembro | 18,14 | 20,77 | 22,56 | 23,41 | 23,25 | 22,02 | 19,70 | 16,28 | 11,76 |
| Janeiro | 16,09 | 18,72 | 20,53 | 21,42 | 21,31 | 20,15 | 17,91 | 14,57 | 10,17 |
| Fevereiro | 9,45 | 11,58 | 13,01 | 13,66 | 13,46 | 12,38 | 10,37 | 7,45 | 3,63 |
| Março | 2,88 | 4,48 | 5,49 | 5,83 | 5,47 | 4,37 | 2,52 | 0,00 | 0,00 |
| Abril | 0,00 | 0,91 | 1,92 | 2,32 | 2,07 | 1,14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Maio | 0,00 | 0,45 | 1,09 | 1,24 | 0,86 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Junho | 0,00 | 0,07 | 1,03 | 1,47 | 1,35 | 0,62 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Julho | 0,00 | 0,27 | 0,96 | 1,15 | 0,81 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Agosto | 0,00 | 0,96 | 1,79 | 2,07 | 1,74 | 0,80 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Setembro | 0,96 | 2,51 | 3,48 | 3,82 | 3,49 | 2,45 | 0,68 | 0,00 | 0,00 |
| Outubro | 8,24 | 10,47 | 11,97 | 12,66 | 12,48 | 11,38 | 9,33 | 6,34 | 2,41 |
| Novembro | 15,38 | 18,09 | 19,95 | 20,87 | 20,78 | 19,63 | 17,36 | 13,99 | 9,53 |
| Total | 6,74 | 8,70 | 10,00 | 10,57 | 10,35 | 9,30 | 7,39 | 4,63 | 1,02 |

Analisando a Tabela 6.6, verifica-se que, para a cidade de Porto Alegre, a instalação de um sistema fotovoltaico com seguimento azimutal deve ter sua inclinação próxima do valor da latitude. O maior ganho anual médio do conjunto móvel ($\beta=25^\circ$) em relação ao fixo foi 11%.

6.3.8 Irradiância anual (diversas cidades): comparação de ganho energético de superfícies com seguimento azimutal em relação a fixa.

Neste item serão apresentadas diversas tabelas de ganho energético relacionando superfícies com seguimento solar (correção do azimute) à superfícies fixas, em diversas cidades (em diferentes latitudes), com isto será possível estimar se este tipo de equipamento é apropriado para estas regiões. Os valores da radiação solar das superfícies foram gerados da mesma forma que para Porto Alegre.

As Tabelas 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 e 6.11 mostram o ganho energético mensal de superfícies com seguimento solar e com a variação da inclinação (5° em 5°), em relação a superfícies estáticas e com inclinação igual à latitude local, para as cidades de Aracaju ($\phi=-11^\circ$), São Paulo ($\phi=-23,5^\circ$), Macapá ($\phi=0^\circ$), Manaus ($\phi=-3^\circ$) e Recife ($\phi=-8^\circ$), respectivamente.

A média total, do ganho em cada tabela, foi obtido com a soma dos 365 dias estimado para cada sistema e não com a média aritmética do ganho de cada mês.

Tabela 6.7 Ganho energético mensal para diferentes inclinações da superfície (móvel) em relação à fixa (Aracaju).

| Ângulo de inclinação do sistema fixo 11° , seguidor azimutal (β°) - Aracaju | | | | | | | | | |
|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| β° | 1 | 6 | 11 | 16 | 21 | 26 | 31 | 36 | 41 |
| Ganho (%) | | | | | | | | | |
| Dezembro | 6,48 | 10,60 | 14,06 | 16,73 | 18,49 | 19,26 | 18,96 | 17,53 | 14,94 |
| Janeiro | 5,36 | 9,00 | 12,04 | 14,35 | 15,83 | 16,41 | 16,01 | 14,59 | 12,13 |
| Fevereiro | 3,51 | 7,57 | 11,01 | 13,72 | 15,58 | 16,50 | 16,40 | 15,23 | 12,96 |
| Março | 0,17 | 0,40 | 0,15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Abril | 0,00 | 0,00 | 1,20 | 1,92 | 2,05 | 1,53 | 0,34 | 0,00 | 0,00 |
| Maio | 0,00 | 0,00 | 2,59 | 4,77 | 6,25 | 6,94 | 6,79 | 5,76 | 3,81 |
| Junho | 0,00 | 0,00 | 1,86 | 3,77 | 5,03 | 5,58 | 5,36 | 4,34 | 2,49 |
| Julho | 0,00 | 0,00 | 2,02 | 3,97 | 5,25 | 5,80 | 5,56 | 4,50 | 2,59 |
| Agosto | 0,00 | 0,14 | 2,55 | 4,34 | 5,43 | 5,76 | 5,27 | 3,93 | 1,72 |
| Setembro | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Outubro | 3,03 | 7,42 | 11,16 | 14,14 | 16,23 | 17,33 | 17,36 | 16,26 | 13,99 |
| Novembro | 5,30 | 9,34 | 12,72 | 15,34 | 17,07 | 17,83 | 17,54 | 16,15 | 13,63 |
| Total | 0,36 | 2,89 | 4,88 | 6,26 | 6,95 | 6,89 | 6,05 | 4,40 | 1,91 |

Para a cidade de Aracaju o ajuste da inclinação em 21° para o conjunto móvel, proporcionou o maior ganho anual (7%) em relação ao conjunto fixo.

Tabela 6.8 Ganho energético mensal para diferentes inclinações da superfície (móvel) em relação à fixa (São Paulo).

| Ângulo de inclinação do sistema fixo 23,5°, seguidor azimutal (β°) - São Paulo | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| β° | 3,5 | 8,5 | 13,5 | 18,5 | 23,5 | 28,5 | 33,5 | 38,5 | 43,5 |
| Ganho (%) | | | | | | | | | |
| Dezembro | 10,31 | 13,04 | 15,18 | 16,64 | 17,35 | 17,24 | 16,26 | 14,40 | 11,64 |
| Janeiro | 8,30 | 10,56 | 12,28 | 13,38 | 13,80 | 13,48 | 12,40 | 10,54 | 7,87 |
| Fevereiro | 5,41 | 7,96 | 9,94 | 11,28 | 11,91 | 11,77 | 10,81 | 9,02 | 6,38 |
| Março | 1,24 | 3,71 | 5,65 | 6,99 | 7,66 | 7,60 | 6,77 | 5,15 | 2,73 |
| Abril | 0,00 | 0,00 | 1,45 | 2,43 | 2,84 | 2,63 | 1,76 | 0,22 | 0,00 |
| Maió | 0,00 | 0,00 | 0,36 | 1,19 | 1,50 | 1,26 | 0,43 | 0,00 | 0,00 |
| Junho | 0,00 | 0,00 | 0,11 | 0,90 | 1,20 | 0,97 | 0,19 | 0,00 | 0,00 |
| Julho | 0,00 | 0,00 | 0,32 | 0,98 | 1,17 | 0,84 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Agosto | 0,00 | 0,00 | 0,93 | 1,91 | 2,33 | 2,15 | 1,33 | 0,00 | 0,00 |
| Setembro | 0,00 | 1,19 | 2,44 | 3,17 | 3,34 | 2,91 | 1,84 | 0,13 | 0,00 |
| Outubro | 4,34 | 6,66 | 8,45 | 9,65 | 10,20 | 10,04 | 9,13 | 7,44 | 4,99 |
| Novembro | 8,52 | 11,30 | 13,47 | 14,97 | 15,70 | 15,61 | 14,65 | 12,79 | 10,03 |
| Total | 2,19 | 4,36 | 6,03 | 7,14 | 7,62 | 7,42 | 6,51 | 4,86 | 2,48 |

Na cidade de São Paulo a inclinação anual de 23,5° ($\beta=\phi$) pra superfície móvel, apresentou 8,% de ganho energético anual em relação à superfície fixa.

Tabela 6.9 Ganho energético mensal para diferentes inclinações da superfície (móvel) em relação à fixa (Macapá).

| Ângulo de inclinação do sistema fixo 0°, seguidor azimutal (β°) - Macapá | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| β° | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
| Ganho (%) | | | | | | | | | |
| Dezembro | 0,00 | 4,08 | 7,61 | 10,45 | 12,49 | 13,65 | 13,83 | 12,99 | 0,00 |
| Janeiro | 0,00 | 3,36 | 6,20 | 8,44 | 9,97 | 10,72 | 10,63 | 9,65 | 0,00 |
| Fevereiro | 0,00 | 3,16 | 5,79 | 7,82 | 9,15 | 9,71 | 9,44 | 8,30 | 0,00 |
| Março | 0,00 | 2,74 | 4,98 | 6,63 | 7,61 | 7,88 | 7,37 | 6,06 | 7,64 |
| Abril | 0,00 | 2,59 | 4,70 | 6,24 | 7,15 | 7,36 | 6,84 | 5,54 | 0,00 |
| Maió | 0,00 | 3,44 | 6,35 | 8,63 | 10,17 | 10,92 | 10,78 | 9,74 | 0,00 |
| Junho | 0,00 | 4,39 | 8,20 | 11,31 | 13,58 | 14,93 | 15,26 | 14,51 | 0,00 |
| Julho | 0,00 | 3,75 | 6,96 | 9,51 | 11,29 | 12,23 | 12,24 | 11,29 | 0,00 |
| Agosto | 0,00 | 3,57 | 6,57 | 8,91 | 10,49 | 11,22 | 11,05 | 9,91 | 0,00 |
| Setembro | 0,00 | 3,31 | 6,07 | 8,18 | 9,54 | 10,09 | 9,76 | 8,50 | 0,00 |
| Outubro | 0,00 | 3,55 | 6,53 | 8,84 | 10,39 | 11,08 | 10,86 | 9,67 | 0,00 |
| Novembro | 0,00 | 4,02 | 7,47 | 10,22 | 12,18 | 13,24 | 13,33 | 12,39 | 0,00 |
| Total | 0,00 | 3,20 | 6,18 | 8,51 | 10,09 | 10,86 | 10,73 | 9,67 | 0,00 |

Em Macapá a análise da inclinação de um conjunto fotovoltaico com seguimento solar se mostra importante, pois o ganho energético em relação ao fixo se acentua bastante entre 20° e 40°, o maior ganho anual foi de 11% com ajuste de 25° de inclinação para a superfície móvel.

Tabela 6.10 Ganho energético mensal para diferentes inclinações da superfície (móvel) em relação à fixa (Manaus).

| Ângulo de inclinação do sistema fixo 3°, seguidor azimutal (β°) - Manaus | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| β° | 0 | 3 | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 | 33 | 38 |
| Ganho (%) | | | | | | | | | |
| Dezembro | 1,27 | 3,46 | 6,72 | 9,39 | 11,39 | 12,61 | 12,99 | 12,46 | 10,99 |
| Janeiro | 1,05 | 3,07 | 6,06 | 8,49 | 10,27 | 11,33 | 11,59 | 10,99 | 9,52 |
| Fevereiro | 0,70 | 2,75 | 5,78 | 8,25 | 10,06 | 11,14 | 11,40 | 10,81 | 9,32 |
| Março | 0,21 | 0,40 | 0,38 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Abril | 0,00 | 0,38 | 1,31 | 1,78 | 1,74 | 1,16 | 0,03 | 0,00 | 0,00 |
| Maio | 0,00 | 0,96 | 3,91 | 6,31 | 8,04 | 9,05 | 9,25 | 8,59 | 7,05 |
| Junho | 0,00 | 0,85 | 3,95 | 6,50 | 8,40 | 9,55 | 9,89 | 9,37 | 7,95 |
| Julho | 0,00 | 0,96 | 4,27 | 6,99 | 9,02 | 10,28 | 10,69 | 10,20 | 8,75 |
| Agosto | 0,00 | 1,16 | 4,11 | 6,47 | 8,15 | 9,07 | 9,16 | 8,36 | 6,65 |
| Setembro | 0,00 | 0,90 | 2,15 | 2,89 | 3,08 | 2,67 | 1,65 | 0,00 | 0,00 |
| Outubro | 0,56 | 2,71 | 5,88 | 8,44 | 10,28 | 11,32 | 11,48 | 10,72 | 8,99 |
| Novembro | 1,09 | 3,24 | 6,42 | 9,00 | 10,89 | 11,98 | 12,22 | 11,55 | 9,93 |
| Total | 0,00 | 1,28 | 3,80 | 5,77 | 7,10 | 7,74 | 7,61 | 6,69 | 4,94 |

Na cidade de Manaus o maior ganho energético anual foi de 8% e ocorreu com a inclinação de 23°, mas ganhos importantes se verificam para inclinação a partir de 18°.

Tabela 6.11 Ganho energético mensal para diferentes inclinações da superfície (móvel) em relação à fixa (Recife).

| Ângulo de inclinação do sistema fixo 8°, seguidor azimutal (β°) - Recife | | | | | | | | | |
|---|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| β° | 0 | 3 | 8 | 13 | 18 | 23 | 28 | 33 | 38 |
| Ganho (%) | | | | | | | | | |
| Dezembro | 4,12 | 6,76 | 10,70 | 13,94 | 16,37 | 17,87 | 18,36 | 17,76 | 16,03 |
| Janeiro | 3,51 | 5,95 | 9,58 | 12,53 | 14,71 | 16,01 | 16,35 | 15,67 | 13,93 |
| Fevereiro | 2,04 | 4,36 | 7,79 | 10,60 | 12,67 | 13,92 | 14,26 | 13,64 | 12,02 |
| Março | 0,51 | 6,01 | 14,66 | 22,42 | 29,02 | 34,24 | 37,88 | 39,78 | 39,81 |
| Abril | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Maio | 0,00 | 0,00 | 1,54 | 3,63 | 5,08 | 5,81 | 5,76 | 4,89 | 3,16 |
| Junho | 0,00 | 0,00 | 1,52 | 3,72 | 5,32 | 6,24 | 6,41 | 5,79 | 4,35 |
| Julho | 0,00 | 0,00 | 1,52 | 3,62 | 5,11 | 5,90 | 5,95 | 5,20 | 3,63 |
| Agosto | 0,00 | 0,00 | 0,86 | 2,04 | 2,62 | 2,57 | 1,84 | 0,41 | 0,00 |
| Setembro | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Outubro | 1,56 | 4,20 | 8,15 | 11,40 | 13,84 | 15,36 | 15,86 | 15,28 | 13,57 |
| Novembro | 3,31 | 5,80 | 9,50 | 12,51 | 14,72 | 16,04 | 16,37 | 15,65 | 13,84 |
| Total | 0,00 | 1,78 | 4,50 | 6,62 | 8,06 | 8,75 | 8,63 | 7,65 | 5,77 |

O maior ganho anual obtido para cidade de Recife foi de 9%, com inclinação de 23° para o sistema com seguimento em relação ao fixo.

6.3.9 Custo da energia elétrica gerada com e sem seguidor solar (exemplo)

Se for usado o valor estimado de energia solar anual para Porto Alegre, conforme o item 6.3.7, é possível fazer uma projeção do valor do kWh gerado por um sistema autônomo com módulos fotovoltaicos instalados em uma estrutura fixa ou móvel.

Usando as mesmas planilhas de cálculos, a irradiação diária estimada para a instalação fixa é de 4,4 kWhm⁻² e para o sistema com seguimento solar (azimutal) 4,9 kWhm⁻². Com estes dados de energia será exemplificado um pequeno sistema autônomo fotovoltaico utilizando três módulos fotovoltaicos da marca Kyocera, um seguidor solar (do experimento), uma estrutura fixa para suportar os módulos fotovoltaicos e demais componentes, tais como, baterias, regulador de tensão e materiais diversos (conectores, fios, etc.).

O custo da estrutura metálica para um sistema fixo de três módulos, mais seis pinturas de manutenção preventiva (25 anos) é orçada em R\$ 580,00. Desta forma é possível apresentar a Tabela 6.12 com os principais componentes de um sistema autônomo (seus valores) e o custo total de cada sistema fotovoltaico.

Tabela 6.12 Custo dos componentes de um sistema autônomo e custo total cada sistema.

| Componente | Quantidade | Custo (R\$) |
|-----------------------------------|------------|----------------|
| Bateria 12V - 150A (Para 25 anos) | 6 | 2700,00 |
| Controlador de carga (300W) | 1 | 300,00 |
| Diversos (Fios, conectores, etc.) | | 50,00 |
| Módulos KC85T | 3 | 4710,00 |
| Subtotal | | 7760,00 |
| Seguidor solar | 1 | 1078,00 |
| Estrutura fixa | 1 | 580,00 |
| Sistema | | |
| Sistema Móvel (total): | | 8838,00 |
| Sistema Fixo (total): | | 8340,00 |

Com o valor da irradiação diária de cada sistema, chega-se a uma produção anual de 314,4 kWh/ano ($4,4 \cdot 5,02A \cdot 13V \cdot 3_{\text{módulos}} \cdot 365_{\text{dias}}$) de energia para o sistema fixo e 350 kWh/ano para o sistema móvel, ou seja, uma produção 11% maior com o seguimento solar.

Para estimar o valor da energia será adotada uma taxa de retorno de 10% ao ano e vida útil de 25 anos dos sistemas. Será usada a equação que segue, conforme Arruda, 1996:

$$R_r = C_r \left[\frac{i_r (1 + i_r)^{n_r}}{(1 + i_r)^{n_r} - 1} \right] \quad (6.8)$$

aonde i_r é a taxa de atratividade financeira anual (10%), C_r (em reais) o investimento total de implantação do sistema, n_r o tempo de vida útil do sistema fotovoltaico e R_r (em reais) o valor de recuperação anual.

Com o valor de recuperação anual se pode determinar o custo do kWh, basta dividi-lo pelo valor de produção anual de energia. Após os cálculos se obtém o valor de recuperação para o sistema fixo de R\$ 917,00 ao ano e R\$ 2,91/ kWh. Para o sistema com seguimento, o valor de recuperação é R\$ 972,00 ao ano e R\$ 2,77/ kWh.

Este simples exemplo não pretende discutir um projeto de sistema autônomo fotovoltaico, pois foge ao escopo deste trabalho, mas fica claro que na escolha de um sistema com seguimento solar é possível reduzir os custos de produção energética, seja o valor do kWh ou através do número de módulos a serem usados, dependendo da carga de consumo do projeto. O valor de retorno financeiro direto em algumas situações pode tender a zero, pois a utilização de um sistema autônomo pode ser a única solução de geração elétrica.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal comparar a produção energética de um sistema de geração fotovoltaica instalado em uma estrutura fixa, com outro sistema de geração fazendo uso de um seguidor solar com movimento no eixo vertical (correção do azimute). Para esta finalidade foi desenvolvido no Laboratório de Energia Solar um seguidor solar azimutal de baixo custo e fácil instalação. O equipamento construído usou recursos simples de mecânica (polias, correia, rolamentos, etc.) e controle eletrônico eficiente, baseado em um microcontrolador programável (8051).

O seguidor solar funcionou satisfatoriamente, tanto em dias com alta radiação solar 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 o Sol. Também detectou dias totalmente nublados e se posicionou após um período de testes (3h), na posição programada (½ dia - norte geográfico). As demais funções de controle do sistema de seguimento funcionaram corretamente, tais como, temporização, função de ajuste dos sensores magnético e óptico, identificação de noite e dia, sistema anti-relâmpago para o período noturno e intensidade luminosa.

A metodologia usada para medir o ganho energético do sistema móvel em relação ao conjunto 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.

Foi constatada a coerência nos valores estimados de irradiância sobre uma superfície inclinada fixa ou móvel, a partir dos valores medidos de radiação global horizontal.

Um sistema de seguimento solar incrementa a produção energética de um conjunto fotovoltaico, principalmente em períodos do ano ou em locais com grande irradiação média diária (grande parcela de radiação direta). Os pequenos sistemas autônomos poderiam se beneficiar desta tecnologia, mas as possíveis 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 azimutal poderiam auxiliar na redução de custos da implantação de um sistema de geração elétrica, pois seria possível diminuir o número de módulos fotovoltaicos instalados e dependendo da produção energética do sistema, o valor da energia poderia cair sensivelmente.

Sistemas conectados à rede elétrica são os principais alvos de equipamentos de seguimento solar, pois toda a produção energética gerada pelos módulos fotovoltaicos é entregue

imediatamente à rede elétrica (após a conversão cc-ca). Logo, um sistema conectado à rede terá um aumento significativo de produção diária de energia, pois em horários de alta demanda como períodos da manhã e tarde, o acréscimo de energia que o sistema com seguimento pode entregar à rede elétrica pode ser decisivo em um projeto, também o valor de kWh tende a ser menor.

O sistema de seguimento azimutal não é o equipamento que leva um conjunto de módulos a ter o melhor aproveitamento da radiação direta, mas contribui significativamente no aumento de produção energética, conforme mostrou o experimento. O seguidor solar de mais alto desempenho, sem concentração, é o sistema de dois eixos, que não foi objeto de estudo deste trabalho, mas um grande número de centrais fotovoltaicas usa este tipo de equipamento e outros com ajuste em um único eixo (polar, eixo móvel leste-oeste, etc.).

A breve análise de dados de radiação anual, gerados por computador para diferentes cidades brasileiras, indicou que a variação da inclinação da superfície com seguimento azimutal em relação à superfície fixa (inclinação igual à latitude local), 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) 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.
- 2) Adequar esta metodologia para analisar o sistema de seguimento solar em relação a um sistema fixo, mas ambos conectados diretamente na rede elétrica.
- 3) Aperfeiçoar o *software* de controle do seguidor azimutal desenvolvido no Laboratório de Energia Solar, para que efetue o balanço energético do sistema antes de se mover.
- 4) Desenvolver um equipamento de seguimento solar microcontrolado, que com simples ajuste de inclinação e comando por software, possa funcionar de forma polar, azimutal ou com eixo móvel (leste-oeste ou sul-norte). Para ser usado principalmente em pesquisas.
- 5) Desenvolver um programa que faça simulações com dados de radiação solar (gerados por *software* ou medidos) e determine o ganho energético de uma superfície em movimento (todos os tipos de geometria de seguimento solar), em relação a superfícies fixa ou em movimento. Que contemple 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 energia solar (térmica e fotovoltaica).

Referências Bibliográficas

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

Arruda, S. R., 1996. “**Matemática Financeira ao alcance de todos**”, Sagra-Luzzato.

Canãda J., Utrillas M.P., Martinez-Lozano J.A., Pedrós R., Gómez-Amo J.L., Maj A., 2007. “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.

Castro R. M. G., 2007. “**Introdução a Energia Fotovoltaica**”. Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico.

Collares-Pereira, M., Rabl, A., 1979. “The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values”. **Solar Energy**, vol.22, pp.155-164.

Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, “**Solar Engineering of Thermal Processes**”, John Wiley & Sons.

Garcia, F.H., 2004. “**Análise Experimental e Simulação de Sistemas Híbridos Eólico-Fotovoltaicos**”, Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre.

Gimenez, S.P., 2002. “**Microcontroladores 8051**”, Pearson Education do Brasil Ltda.

Hecktheuer, L.A., 2001. “**Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos**”, Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre.

Hein M., Dimroth F., Siefert G., Bett A.W., 2003. “Characterisation of a 300x photovoltaic concentrator system with one-axis tracking”. **Solar Energy Materials & Cells**, vol.75, pp.277-283.

Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y., and Demirkol, S., 2004. "Determining optimum tilt angles and orientation of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey". **Renewable Energy**, vol. 29, pp.1265-1275.

Informativo, 2007. "Phase One of 40 MW German Solar Park Begun". **Renewable Energy**, capturado em 11/08/2008.

Karimov Kh. S., Saqip M.A., Akhter P., Ahmed M. M., Chatta J.A., Yousafzai S.A., 2005. "A simple photo-voltaic tracking system". **Solar Energy Materials & Solar Cells**, vol.87, pp.49-59.

Kasten F., Young A.T., 1989. "**Revised Optical Air Mass Tables and Approximation Formula**". *Applied Optics* vol.28, pp.4735-4738.

Kline, S.J., 1985. "The purpose of uncertainty analysis". **Journal of Fluids Engineering**, vol.107/153.

Krenzinger, A., Farenzena, D. S., 2004. "**SEQMETBR**". *Software* disponível em <ftp://ftp.solar.ufrgs.br/Progs/>.

Kyocera, 2008. "**Informativo KC85T**". <http://kyocerasolar.com.br/site/modulosolar.html>, capturado em 16/01/2008.

Liu, B.Y.H., Jordan, R.C., 1961. "Daily insolation on surfaces tilted toward the equator". **ASHARE journal**, 3(10), pp.53-59, Oct.

Maso P.D., 2007. "**Parque Fotovoltaico de Serpa**". <http://www.catavento.pt>, capturado em 30/06/2008.

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

Mecasolar, 2008. "**Começa a construção da maior Central Solar com seguimento de 2 eixos da Europa**". <http://www.mecasolar.com>, capturado em 04/08/2008.

Mendes, R.M., 2007. “**Elementos de Máquinas**”. Escola Superior de Tecnologia - IPS, Setúbal.

Mosalan S.M.A., Ghetas A., Sabry M., 1995. “V-Trough Concentrator on a Photovoltaic Full Tracking System in a Hot Desert Climate”. **Renewable Energy**, vol.6, no.5-6, pp.527-532.

Oliveira, C. A. A., 2007. “**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.

Oliveira Jr., K. S. e Saraiva, M. F. O., 2004. “**Astronomia e Astrofísica**”, Editora Livraria da Física.

Orgill, J.F., Hollands, K.G.T., 1977. “Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface”. **Solar Energy**, vol.19, pp. 357-359.

Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., Menicucci, D., 1987. “A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces”. **Solar Energy**, vol.39, pp. 221-231.

Poulek, V., Libra, M., 1998. “New solar tracker”. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, vol.51, pp.113-120.

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

Poulek, V., Libra, M., 2000. “A new low-cost tracking ridge concentrator”. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, vol.61, pp.199-202.

Roth P., Georgiev A., Boudinov H., 2004. “Design and construction of a system for sun-tracking”. **Renewable Energy**, vol.29, pp.393-402.

Shalimova, K.V., 1975. “**Física de los Semicondutores**”, Editora Mir, Moscou, URSS.

Silva Jr., V.P. 1990. “**Microcontrolador 8051**”, Editora Érica.

Shayani, R. A., 2006. “**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.

Vallêra M.A., Brito C.M., 2006. “Meio Século de História Fotovoltaica”. **Gazeta de Física**, vol.29, pp.10-15.

Vilela O.C., Fraidenraich N., Tiba C., 2003. “Photovoltaic pumping systems driven by tracking collectors. Experiments and simulation”. **Solar Energy**, vol.74, pp. 45-52.

Wikipedia, 2008. “**Photovoltaic power station**”. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Photovoltaic_power_stations&redirect=no, capturado em 11/08/2008.

APÊNDICE I

RADIAÇÃO

1. O Sol

O Sol é a estrela mais próxima da Terra, sendo a fonte de luz e vida em nosso planeta. É uma enorme esfera de gás incandescente e em seu núcleo é gerada energia através de reações termo-nucleares. Esta energia é irradiada para todo o sistema solar.

Algumas características do Sol, [Oliveira, Saraiva 2003] são:

Raio = $6,96 \times 10^8$ m .

Temperatura efetiva – $T_{ef} = 5785$ K.

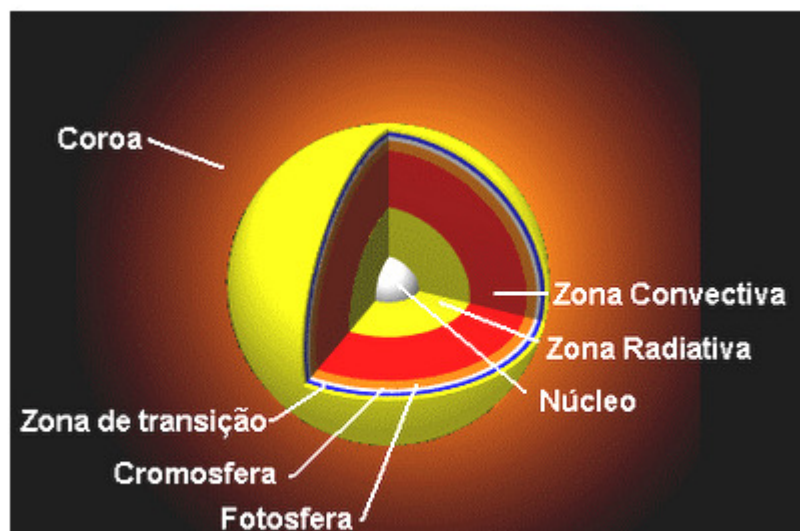
Temperatura central – $T_c = 1,5 \times 10^6$ K.

Distância da Terra – 1UA = $1,496 \times 10^8$ Km.

Período rotacional no equador – 25 dias, na latitude 60 graus 29 dias.

Composição química principal – hidrogênio (91,2%), hélio (8,7%), oxigênio (0,078%) e carbono (0,049%).

A estrutura básica do Sol pode ser vista na Figura A1.1, suas camadas são descritas a seguir.



Estrutura Solar

Figura A1.1 Estrutura solar (fonte: Astroclube)

Núcleo, com temperatura de aproximadamente 10 milhões de graus Kelvin, região onde é produzida a energia através de reações termo nucleares (quatro prótons são fundidos em um núcleo de hélio, com liberação de energia).

A zona radiativa se estende por três quartos do raio do Sol, a energia flui por irradiação para outras camadas do mesmo, ao chegar a sua superfície, é irradiada para o espaço.

A zona convectiva possui temperaturas de até dois milhões de graus Kelvin, por ser uma região muito densa e opaca a energia é transportada por imensas correntes de convecção.

A fotosfera é a superfície solar, com 330 km de espessura e temperatura de 5785K. É a fonte da maior parte da radiação visível que chega a Terra, é onde se formam as manchas solares.

A cromosfera estende-se por 10 mil km a partir da fotosfera, tem cor avermelhada, é visível em eclipses solares, e sua temperatura média é de 15.000 K.

A região de transição é uma estreita faixa de aproximadamente 300 km entre a cromosfera e a coroa solar, onde ocorre um aumento drástico de temperatura. Coroa, é a camada mais externa do Sol, estende-se por aproximadamente dois raios solares, com temperaturas que podem chegar a 1.000.000 K.

A teoria mais aceita para explicar as temperaturas superiores da cromosfera e da coroa sobre as da fotosfera é de um fenômeno de transporte de energia por correntes elétricas induzidas por campos magnéticos variáveis. Se a fonte de energia fosse os fótons gerados no núcleo do Sol, suas temperaturas deveriam ser inferiores à da fotosfera.

As medidas atuais determinam que cada metro quadrado na Terra recebe do Sol em média anual uma potência de 1367 Wm^{-2} [Oliveira, Saraiva 2003], com variação de 0,3% durante o ciclo solar de 11 anos. Por esse fluxo determina-se a potência radiante do Sol em $4 \times 10^{26} \text{ W}$ ou $4 \times 10^{33} \text{ ergs/s}$.

2. A radiação solar

Algumas definições importantes precisam ser descritas para o entendimento dos cálculos usados em energia solar. A radiação eletromagnética emitida pelo Sol chega de forma uniforme no topo da atmosfera terrestre, e devido à distância os raios solares podem ser considerados paralelos uns aos outros. O valor da constante solar é o valor já citado, ou seja, $I_{sc} = 1367 \text{ Wm}^{-2}$.

Conceitos importantes e usuais em energia solar:

- a) Irradiância (Wm^{-2}) - taxa de energia radiante incidente em uma superfície por unidade de área desta.
- b) Irradiação (Whm^{-2} ou Jm^{-2}) - energia incidente por unidade de área em uma superfície, obtida por integração da irradiância em um tempo específico.
- c) Radiação direta - radiação solar recebida do Sol sem dispersão da atmosfera terrestre.
- d) Radiação difusa - radiação solar recebida do Sol, após sofrer dispersão atmosférica.
- e) Radiação Global - soma das componentes, direta e difusa recebida em uma superfície.

A energia que chega ao topo da atmosfera terrestre, esta distribuída ao longo do espectro da radiação solar, sendo aproximadamente 95% no intervalo $0,3$ a $2,4 \mu m$ (da região do visível ao infra-vermelho), 1,2% no intervalo $<0,3 \mu m$ e 3,7% no intervalo $>2,4 \mu m$. Na figura A1.2 observa-se à curva de irradiação por comprimento de onda ($W / \mu m^2$) ou irradiância espectral.

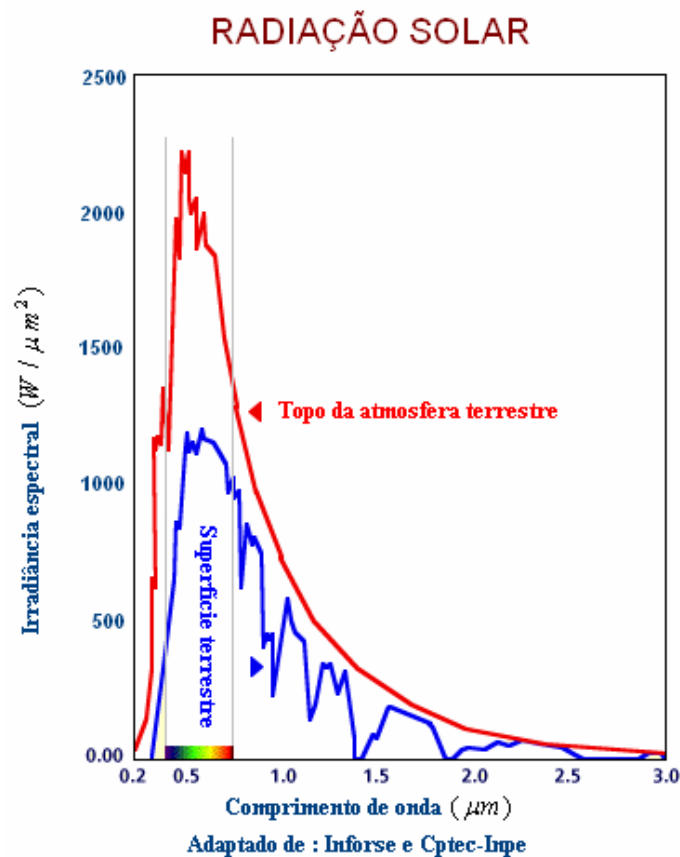


Figura A1.2 Irradiância espectral (adaptado de Inforse e Cptec-Inpe)

A geometria que relaciona o Sol e a Terra é caracterizada por uma órbita elíptica (o plano que a contém chama-se eclíptica), período de translação de um ano, descrita pela Terra ao redor do Sol. A Terra gira em um eixo central chamado eixo polar que forma um ângulo de

23,45° com a normal da eclíptica. A órbita terrestre apresenta uma excentricidade e foi comentada no capítulo 3.

A variação constante entre o plano da eclíptica e o plano equatorial celeste forma o ângulo de declinação solar (δ), ver Figura A1.3, o qual se calcula usando a equação completa (3.4) ou a simplificada;

$$\delta = 23,45 \text{ sen} \left[(dn + 284) \frac{2\pi}{365} \right] \quad (\text{A1.1})$$

onde dn é o número de dias do ano, até a data considerada (ex.:2/02 => $dn=33$). Estas equações simplificadas são baseadas em considerar a órbita terrestre ao redor do Sol circular e com velocidade constante.

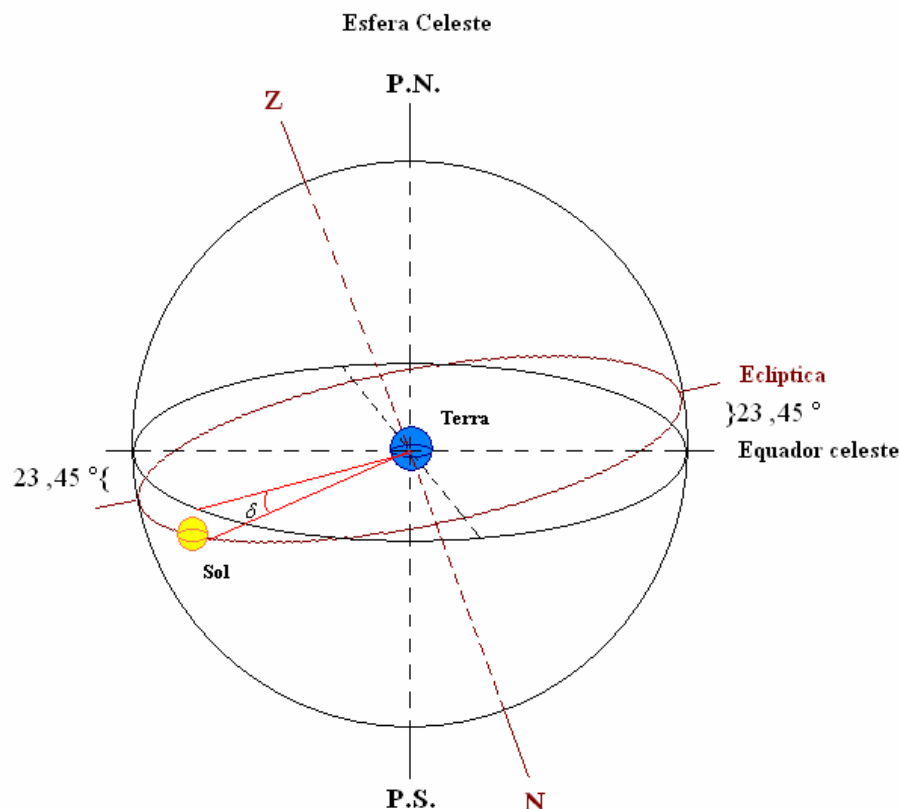


Figura A1.3 Esfera celeste

Analisando a figura A1.3 nota-se além do ângulo de declinação solar (δ), o plano da órbita aparente do Sol em torno da Terra, chamado de eclíptica, a outra elipse é o equador celeste que coincide com o terrestre. A distância máxima entre as elipses é de $23^{\circ}45'$ nos solstícios de verão ($-23^{\circ}45'$) e inverno ($+23^{\circ}45'$), e zero graus nos equinócios de outono e primavera (intersecção da eclíptica e equador celeste, também chamado de ponto gama, ponto de Áries ou ponto Vernal), o ângulo entre as elipses também é observado, seu valor é o do ângulo entre as retas tangentes as elipses (inclinação da Terra). Também se observa que o eixo polar sul equivale ao sul celeste, e o polar norte ao norte celeste. Zênite é o ponto no qual a reta normal ao plano local (ponto qualquer na superfície terrestre) intercepta a esfera celeste, Nadir é o ponto oposto (diametralmente) ao Zênite.

Outro fator a ser comentado é a hora solar que é diferente da hora oficial local. O tempo solar é baseado no movimento angular aparente do Sol, onde o meio dia solar é o momento em que o Sol cruza o meridiano local. Para o cálculo correto, usam-se dois fatores de correção, o primeiro é a diferença do meridiano do observador em relação ao meridiano da hora oficial, o segundo é a equação do tempo que considera a perturbação da taxa de rotação da Terra. A hora solar (ou tempo solar verdadeiro - TSV) está relacionada com a hora local pela seguinte equação:

$$TSV = TO + 4(L_{st} - L_{oc}) + E_t \quad (A1.2)$$

onde TO é a hora oficial, L_{st} é a longitude padrão (45° oeste), L_{oc} é a local, e E_t a equação do tempo que é calculada com a equação:

$$E_t = (0,000075 + 0,001868 \cos \Gamma - 0,032077 \sin \Gamma - 0,014615 \cos 2\Gamma - 0,04089 \sin 2\Gamma) \quad (A1.3)$$

(229,18)

onde, Γ é o ângulo do dia conforme equação (3.2).

Alguns ângulos fundamentais para cálculos em energia solar são observados na Figura A1.4. Também é apresentado um triângulo de posição, que resolvido por geometria esférica mostra a equação do ângulo de zênite.

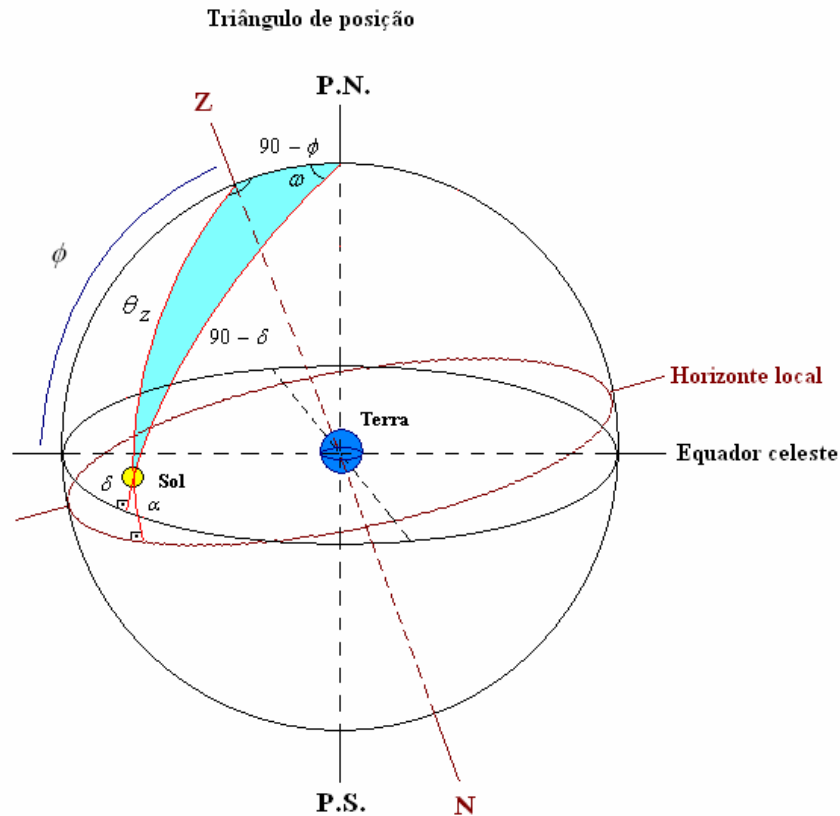


Figura A1.4 Ângulos e triângulo de posição que resolvido mostra a equação do ângulo de zênite.

O ângulo de zênite (θ_z) é formado entre a vertical local (Z) e a reta imaginária ao centro do Sol. A seguinte relação para o cálculo do ângulo de zênite pode ser obtida a partir da Figura A1.4:

$$\cos \theta_z = \cos(90 - \delta) \cos(90 - \phi) + \sin(90 - \delta) \sin(90 - \phi) \cos \omega \quad (\text{A1.4A})$$

Que pode ser simplificada como:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (\text{A1.4B})$$

onde ω é o ângulo horário, δ é o ângulo de declinação solar e ϕ é a latitude local.

O ângulo de altitude solar (α) é formado entre a direção dos raios solares e o plano horizontal, valendo 0° ao nascer e pôr do Sol.

$$\text{sen } \alpha = \text{sen } \delta \text{ sen } \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (\text{A1.5})$$

ou simplesmente,

$$\alpha = 90 - \theta_z \quad (\text{A1.6})$$

onde θ_z é o ângulo de zênite, ω é o ângulo horário, δ é o ângulo de declividade solar e ϕ é a latitude local.

O ângulo horário (ω) é medido entre o meridiano local e o solar, valendo 0° ao meio-dia, variando 15° por hora, negativo pela manhã e positivo após o meio-dia. Pode-se calcular ω , usando-se a seguinte expressão:

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (\text{A1.7})$$

onde TSV é o tempo solar verdadeiro. O valor obtido é em graus. Também pode-se usar a equação (A1.8).

$$\omega = \{[(H_n - 12)60] + m_n\} \frac{1}{4} \quad (\text{A1.8})$$

onde H_n é o número de horas do TSV (0 a 24 horas), m_n o número de minutos. O valor obtido é em graus.

O ângulo de azimute solar (γ_s) é a medida entre o plano do meridiano local e o plano superior do círculo que passa pelo zênite e o Sol. É obtido através da equação:

$$\cos \gamma_s = \frac{\text{sen } \alpha \text{ sen } \phi - \text{sen } \delta}{\cos \alpha \cos \phi} \quad (\text{A1.9})$$

onde α é a elevação solar, δ a declinação solar e ϕ a latitude geográfica.

Uma equação bem mais completa para o cálculo doazimute solar é proposta por Braun e Mitchell (1983), e tem os seguintes passos:

a) Calcula-se o pseudo ângulo de azimute solar (γ'_s) através da equação:

$$\text{sen } \gamma'_s = \frac{\text{sen } \omega \cos \delta}{\text{sen } \theta_z} \quad (\text{A1.10})$$

ou,

$$\tan \gamma'_s = \frac{\text{sen } \omega}{\text{sen } \phi \cos \omega - \cos \phi \tan \delta} \quad (\text{A1.11})$$

onde ω é o ângulo horário, δ a declinação solar, θ_z o ângulo de zênite, e ϕ a latitude.

b) Cálculo do ângulo horário ω_{ew} (leste/oeste) para ser comparado com o ângulo horário:

$$\cos \omega_{ew} = \frac{\tan \delta}{\tan \phi} \quad (\text{A1.12})$$

c) Parâmetros c_1 , c_2 e c_3 para serem usados na equação geral, são determinados da seguinte forma:

$$c_1 = \begin{cases} 1, & \text{se } |\omega| < \omega_{ew} \\ -1, & \text{se } |\omega| \geq \omega_{ew} \end{cases} \quad (\text{A1.13})$$

$$c_2 = \begin{cases} 1, & \text{se } \phi \cdot |\phi - \delta| \geq 0 \\ -1, & \text{se } \phi \cdot |\phi - \delta| < 0 \end{cases} \quad (\text{A1.14})$$

$$c_3 = \begin{cases} 1, & \text{se } \omega \geq 0 \\ -1, & \text{se } \omega < 0 \end{cases} \quad (\text{A1.15})$$

onde δ a declinação solar, ϕ a latitude, ângulo horário ω_{ew} (leste/oeste), e ω é o ângulo horário.

Depois de calculado os valores acima, pode-se determinar o ângulo de azimute solar (γ_s) com a equação geral:

$$\gamma_s = c_1 c_2 \gamma'_s + c_3 \left(\frac{1 - c_1 c_2}{2} \right) 180 \quad (\text{A1.16})$$

onde γ'_s pseudo-ângulo de azimute solar, a solução é em graus.

Pode-se calcular o ângulo de nascer do Sol ω_s (e conseqüentemente o do pôr-do-sol, ângulos simétricos), usando-se a equação:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \phi) \quad (\text{A1.17})$$

onde δ a declividade solar, ϕ a latitude local. Com o valor de ω_s calcula-se o número de horas de luz solar do dia Nd , aproveitando-se a simetria angular da manhã e tarde, assim

$$Nd = \frac{2}{15} \omega_s \quad (\text{A1.18})$$

Na Figura A1.5, se visualiza uma superfície inclinada e os ângulos pertinentes a esta geometria, que são:

- Ângulo de incidência direta (θ_s) sobre uma superfície, formado pela normal desta e o vetor Sol-Terra.
- Ângulo de azimute terrestre (γ), medida entre a projeção da normal da superfície no plano horizontal e o meridiano local.
- Ângulo de inclinação (β) da superfície em relação ao plano horizontal.

E ângulos já descritos anteriormente:

- Ângulo de zênite (θ_z).
- Ângulo de altitude solar (α).
- Ângulo de azimute solar (γ_s).

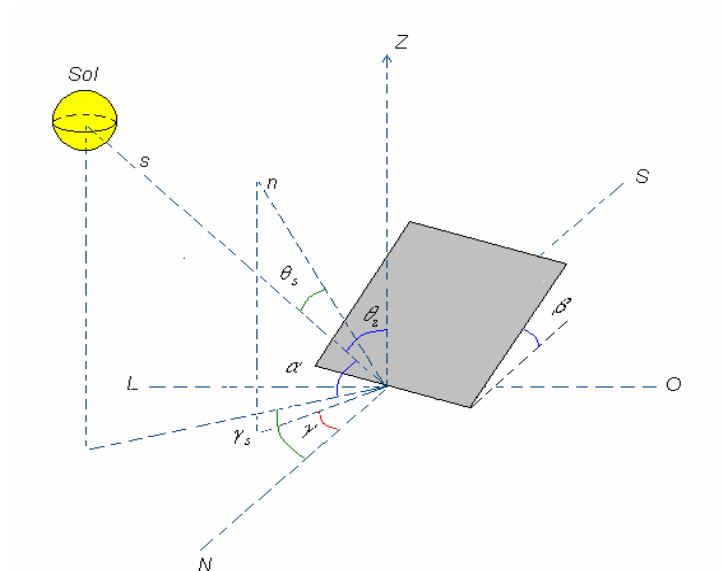


Figura A1.5 Ângulos de incidência direta, inclinação do painel e azimute terrestre.

O ângulo de incidência direta θ_s pode ser calculado com a equação geral:

$$\begin{aligned} \cos \theta_s = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (\text{A1.19})$$

onde δ é a declinação solar, ϕ é a latitude e ω o ângulo horário.

A equação geral pode ser simplificada, dependendo da situação da superfície inclinada, são elas:

- Superfícies com direção fixa, sul (0°) ou norte (180°), onde o módulo de $\cos \gamma = 1$.
- Superfícies verticais, onde $\beta = 90^\circ$, $\sin \beta = 1$.
- Superfícies horizontais, onde $\theta_s = \theta_z$, ou seja, $\beta = 0$, iremos recair na equação (A1.4).

Uma equação mais simples que pode ser usada em várias aplicações, é

$$\cos \theta_s = \cos \beta \cos \theta_z + \sin \beta \sin \theta_z \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (\text{A1.20})$$

onde γ_s ângulo de azimute solar. Esta equação pode ser demonstrada diretamente por um triângulo esférico como é visto na Figura A1.6.

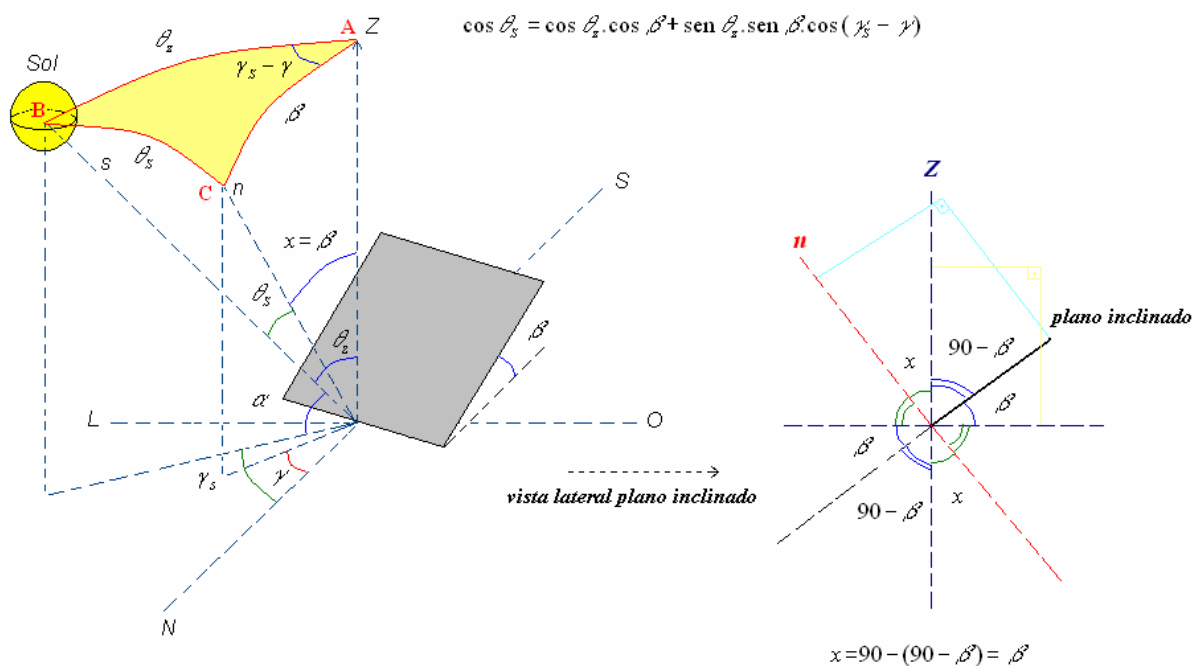


Figura A1.6 Análise do ângulo de incidência direta θ_s , através do triângulo esférico ABC, para uma superfície com inclinação e azimute terrestre qualquer

A equação (A1.20) dá origem à equação 2.11 do ângulo de incidência direta no seguidor azimutal, onde o azimute terrestre e solar são iguais ($\gamma = \gamma_s$).

Para superfícies inclinadas (β graus) na direção norte ou sul (depende do hemisfério), pode-se usar a mesma relação para θ_s que é usada em uma superfície horizontal (θ_z). Para isto usa-se uma latitude artificial na equação A1.8, como segue: $(\phi - \beta)$ para o hemisfério norte, e $(\phi + \beta)$ para o hemisfério sul, as novas equações ficam

$$\cos \theta_s = \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta \quad (\text{A1.21})$$

para o hemisfério norte, e

$$\cos \theta_s = \cos(\phi + \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi + \beta) \sin \delta \quad (\text{A1.22})$$

para o hemisfério sul.

Para um entendimento melhor das equações acima, observe a Figura A1.7, que esclarece o uso da latitude artificial, no caso para o hemisfério norte, onde por convenção a latitude é positiva, o que explica o uso de $\phi - \beta$ na equação (A1.21), e como no hemisfério sul, a latitude é negativa entende-se o uso de $\phi + \beta$ para a equação (A1.22).

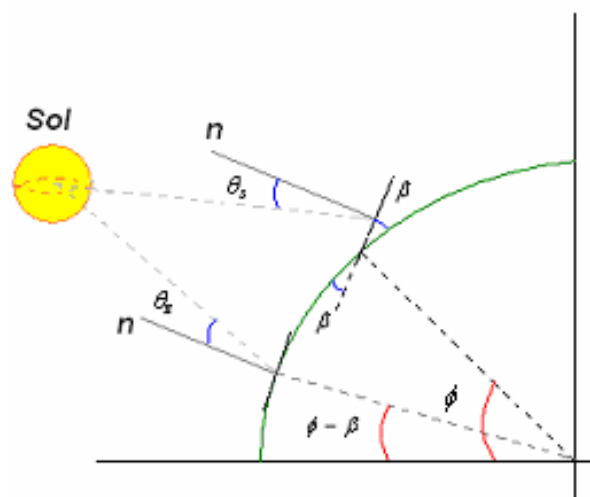


Figura A1.7 Latitude artificial $(\phi - \beta)$ para hemisfério norte e $(\phi + \beta)$, caso contrário.

Também pode-se calcular o ângulo de nascimento do Sol para superfícies inclinadas conforme a equação (A1.23):

$$\omega'_s = \cos^{-1}[-\tan \delta \tan(\phi \pm \beta)] \quad (\text{A1.23})$$

Sendo que se devem comparar os valores encontrados nas equações (A1.17) e (A1.23) e usar o menor ângulo de nascimento solar.

A irradiação extraterrestre incidente em uma superfície horizontal, em um tempo específico, é calculada usando-se inicialmente a equação:

$$\dot{I}_o = I_{sc} E_o \cos \theta_z \quad (\text{A1.24})$$

onde $\dot{I}_o = \frac{dI_o}{dt}$, I_{sc} é constante solar cujo valor é 1367 Wm^{-2} . Usando-se a equação (A1.4) e (A1.24), e convertendo-se o tempo em horas para ângulo horário ($\frac{2\pi}{24} = \frac{d\omega}{dt}$), após integrar em relação a $d\omega$, para um intervalo $[\omega_2, \omega_1]$:

$$I_o = \frac{12}{\pi} I_{sc} E_o \int_{\omega_1}^{\omega_2} \cos \theta_z d\omega \quad (\text{A1.25})$$

chega-se à equação:

$$I_o = \frac{12}{\pi} I_{sc} E_o \{[\omega_2 - \omega_1] \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi (\sin \omega_2 - \sin \omega_1)\} \quad (\text{A1.26})$$

onde ω_2 e ω_1 , são ângulos horários (em radianos) que definem respectivamente o final e o início do intervalo de tempo considerado.

Pode-se calcular a radiação total diária extraterrestre H_o , que vem a ser o somatório de todos os I_o dos intervalos $[\omega_2, \omega_1]$ calculados para o período de um dia, ou seja, a integração da irradiação do nascer (ns) até o pôr-do-sol (PS), como segue:

$$H_o = \int_{ns}^{ps} I_o dt \quad (A1.27)$$

ou considerando a simetria do dia,

$$H_o = 2 \int_0^{ps} I_o dt \quad (A1.28)$$

Assumindo que E_o e a declinação (δ) sejam constantes ao longo do dia e convertendo o tempo dt em ângulo horário; considera-se $0 - \pi$, tem-se:

$$\frac{\pi}{12} = \frac{d\omega}{dt} \therefore dt = \frac{12}{\pi} d\omega \quad (A1.29)$$

assim,

$$H_o = \frac{24}{\pi} \int_0^{ps} I_o d\omega \quad (A1.30)$$

resolvendo a integral e chamando ps de ω_s , já convertendo o ângulo horário do pôr-do-sol de graus para radianos:

$$H_o = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_o \left[\frac{\pi}{180} \omega_s \text{sen} \delta \text{sen} \phi + \cos \delta \cos \phi \text{sen} \frac{\pi}{180} \omega_s \right] \quad (A1.31)$$

Para superfícies inclinadas o cálculo da irradiação extraterrestre sofre mudanças conforme abaixo:

$$I_{o\beta} = I_{sc} E_o \cos \theta_s \quad (A1.32)$$

que é a equação inicial usada para calcular a irradiação extraterrestre em superfícies inclinadas. Note-se que é usado o ângulo de incidência direta θ_s (A1.22), diferente da equação (A1.24) onde é usado o ângulo de zênite θ_z . Analogamente ao desenvolvimento das equações para superfície horizontal, chega-se à irradiação extraterrestre em uma superfície inclinada:

$$I_{o\beta} = \frac{12}{\pi} I_{sc} E_o \{ [\omega_2 - \omega_1] \text{sen } \delta \text{sen}(\phi \pm \beta) + \cos \delta \cos(\phi \pm \beta) (\text{sen } \omega_2 - \text{sen } \omega_1) \} \quad (\text{A1.33})$$

e a radiação total diária extraterrestre para uma superfície inclinada $H_{o\beta}$,

$$H_{o\beta} = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_o \left[\frac{\pi}{180} \omega_s' \text{sen } \delta \text{sen}(\phi \pm \beta) + \cos \delta \cos(\phi \pm \beta) \text{sen} \frac{\pi}{180} \omega_s' \right] \quad (\text{A1.34})$$

Nas equações (A1.33) e (A1.34) usa-se $(\phi + \beta)$ para o hemisfério sul e $(\phi - \beta)$ para o hemisfério norte. O ângulo horário ω_s' é determinado da seguinte forma:

$$\omega_s' = \text{menor}(\omega_s, \omega_s') \quad (\text{A1.35})$$

onde o menor valor de ângulo horário deve ser determinado usando as equações (A1.17) e (A1.23).

3. Radiação solar na superfície terrestre

Neste item, será determinada uma seqüência de equações para o cálculo da irradiação em uma superfície horizontal ou inclinada na superfície terrestre.

Todas as relações geométricas anteriormente citadas poderão ser usadas, mas para o cálculo da irradiação outras equações serão descritas.

A radiação solar é desviada antes de alcançar o solo pela atmosfera terrestre. Suas diversas componentes interagem absorvendo, refletindo e dispersando, assim modificando a

irradiação sobre uma superfície. A pior situação é quando o céu está totalmente nublado ou com excesso de partículas sólidas, quando ocorre uma grande atenuação da radiação solar.

A radiação total que chega a uma superfície horizontal na Terra é chamada de global total e é composta por uma componente direta, radiação que manteve sua trajetória na atmosfera e por uma componente difusa que sofreu interferência atmosférica. A equação (A1.36) representa esta composição:

$$G = G_b + G_d \quad (\text{A1.36})$$

onde G é a radiação global total, G_b radiação direta e G_d a radiação difusa.

Na determinação da irradiação solar na superfície terrestre o efeito das nuvens pode ser caracterizado por duas variáveis, índice de claridade ou transmitância atmosférica (K_t) e fração difusa (K_d). Um índice de claridade alto (próximo de 1) indica pouca ou total ausência de nuvens, caso contrário tem-se um grande índice da componente difusa.

É comum normalizar o valor de radiação global horizontal com seu correspondente extraterrestre, assim chega-se às seguintes relações de índice de claridade:

$$\bar{K}_t = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} \quad (\text{A1.37})$$

$$K_t = \frac{H}{H_o} \quad (\text{A1.38})$$

$$k_t = \frac{I}{I_o} \quad (\text{A1.39})$$

onde \bar{K}_t é valor médio mensal, K_t valor diário e k_t valor horário; e \bar{H} , H e I representam a irradiação global diária em média mensal, diária e horária, respectivamente; \bar{H}_o é o valor diário em média mensal da irradiação extraterrestre, ou seja, a média da soma da irradiação diária extraterrestre de um mês. A irradiação que chega à superfície terrestre não pode ser calculada analiticamente como a extraterrestre, mas pode ser estimada com o uso de alguns modelos estatísticos. Usualmente estes valores são medidos por instrumentos como o piranômetro para

radiação global e o pirheliômetro para radiação direta I_b . A partir destes valores pode ser calculada a componente difusa I_d ($I=I_b+I_d$).

Para calcular a fração difusa usam-se estudos que correlacionam o índice de claridade com as relações de radiação difusa terrestre e radiação extraterrestre, um dos mais empregados (Collares-Pereira e Rabl, 1979; Orgill e Hollands, 1977):

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0,775 + 0,347\left(\frac{\pi}{180}\right)(\omega_c - 90) - [0,505 + 0,261\left(\frac{\pi}{180}\right)(\omega_c - 90)]\cos(114,59\bar{K}_t - 103,13) \quad (\text{A1.40})$$

onde ω_c em graus vale 90° de fevereiro a abril, 80° de agosto a outubro e 100° de novembro a janeiro;

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 0,99 & \text{para } K_t \leq 0,17 \\ 1,188 - 2,272K_t + 9,473K_t^2 - 21,856K_t^3 + 14,648K_t^4 & \text{para } 0,17 \leq K_t \leq 0,75 \\ 0,54K_t^3 + 14,648K_t^4 & \text{para } 0,75 < K_t < 0,80 \\ 0,2 & \text{para } K_t \geq 0,80 \end{cases} \quad (\text{A1.41})$$

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1 - 0,249k_t & \text{para } 0 \leq k_t < 0,35 \\ 1,577 - 1,84k_t & \text{para } 0,35 \leq k_t \leq 0,75 \\ 0,177 & \text{para } k_t > 0,75 \end{cases} \quad (\text{A1.42})$$

nas expressões acima \bar{H}_d , H_d e I_d , representa a irradiação difusa diária média mensal, média diária e horária, respectivamente. É importante mencionar que a fração difusa média mensal $\bar{K}_d = \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$ é determinada pela equação (A1.40), e as demais frações K_d (difusa diária) e k_d (difusa horária) pela (A1.41) e (A1.42), nesta ordem.

A energia radiante incidente em uma superfície pode ser parcialmente refletida, absorvida ou transmitida, as propriedades de materiais associados com estas funções são refletância, absortância e transmitância. É comum usar o termo albedo (ρ) no lugar de refletância. O albedo pode ser definido como:

$$\rho = \frac{\text{radiação refletida por uma superfície}}{\text{radiação incidente em uma superfície}} \quad (\text{A1.43})$$

Em superfícies inclinadas, a radiação refletida pela superfície do entorno irá compor a componente difusa, ou seja, as características de refletância ou albedo irão influir na quantidade de radiação difusa recebida por esta superfície. O albedo depende da distribuição espectral, da radiação incidente e sofre influência da altitude solar. Quanto mais alto, menor é o albedo. As superfícies aquáticas ainda interferem no albedo com a refração e o ângulo de incidência.

Na Tabela 3.1 do capítulo 3 se apresenta o valor do coeficiente de albedo para alguns tipos de superfícies.

Para o cálculo da irradiação refletida (albedo) considera-se a reflexão como isotrópica, e as refletâncias da radiação difusa e direta como iguais. Também se considera nos cálculos de irradiação difusa e refletida o fator de forma ou de visão, que pode ser entre uma superfície inclinada e o céu F_{c-s} , ou entre uma superfície inclinada e o solo F_{c-g} . As equações que as determinam são:

$$F_{c-s} = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta) \quad (\text{A1.44})$$

$$F_{c-g} = \frac{1}{2}(1 - \cos \beta) \quad (\text{A1.45})$$

em ambas as equações β é a inclinação da superfície (do painel, coletor, etc.), os valores determinados são adimensionais.

Para o cálculo da irradiação terrestre global horária em uma superfície inclinada I_{β} , consideram-se as componentes de irradiação direta $I_{b\beta}$, difusa $I_{d\beta}$ e refletida $I_{r\beta}$, todas para esta inclinação (β), conforme a equação:

$$I_{\beta} = I_{b\beta} + I_{d\beta} + I_{r\beta} \quad (\text{A1.46})$$

a unidade é em (Whm^{-2}). Cada componente será determinada pelas equações básicas:

$$I_{r\beta} = \frac{1}{2} I \rho (1 - \cos \beta) \quad (A1.47)$$

onde I é irradiação global sobre superfície horizontal terrestre;

$$I_{b\beta} = I_b \left(\frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_z} \right) = I_b R_b \quad (A1.48)$$

onde I_b é a irradiação direta sobre a superfície horizontal, R_b é o fator geométrico (conforme Duffie et al, 1991). Uma equação simples para determinar a componente de irradiação difusa é o modelo isotrópico (ou de Liu e Jordan, 1961):

$$I_{d\beta} = \frac{1}{2} I_d (1 + \cos \beta) \quad (A1.49)$$

onde I_d é a irradiação difusa horizontal terrestre (pode ser determinada pela equação (A1.42)).

Pelas inúmeras variáveis que influenciam na distribuição da radiação difusa no céu um dos modelos mais usados é o de Perez et al, 1987, usado nesta dissertação. Este leva em consideração uma radiância difusa incremental na região circumsolar e numa parte do horizonte, no resto do céu assume uma radiância constante. É um modelo não isotrópico (anisotrópico). O valor do incremento circumsolar (coeficiente de claridade F_1) e horizontal (coeficiente de claridade F_2) é função de três parâmetros que determinam as condições do céu a cada momento, são eles:

- Ângulo de zênite solar θ_z .
- Parâmetro de claridade Δ :

$$\Delta = \frac{m_a I_d}{I_{on}} \quad (\text{A1.50})$$

onde m_a é a massa de ar, e $I_{on} = I_{sc} E_o$ irradiação extraterrestre normal.

- Parâmetro de transparência ε :

$$\varepsilon = \frac{I_d + I_{bn}}{I_d} \quad (\text{A1.51})$$

onde I_{bn} é irradiação direta normal.

A equação geral para o cálculo de irradiação difusa para uma superfície inclinada segundo Perez et al, 1987, é

$$I_{d\beta} = I_d \left[\frac{1}{2} (1 + \cos \beta) (1 - F_1) + F_1 \left(\frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_z} \right) + F_2 \sin \beta \right] \quad (\text{A1.52})$$

onde os coeficientes F_1 e F_2 são obtidos como segue:

$$F_1 = F_{11}(\varepsilon) + F_{12}(\varepsilon)\Delta + F_{13}(\varepsilon)\theta_z \quad (\text{A1.53})$$

$$F_2 = F_{21}(\varepsilon) + F_{22}(\varepsilon)\Delta + F_{23}(\varepsilon)\theta_z \quad (\text{A1.54})$$

onde os valores de F_{ij} são descritos na Tabela A.1.

Tabela A.1 - Coeficientes do modelo Perez

| Intervalo | \mathcal{E} | F_{11} | F_{12} | F_{13} | F_{21} | F_{22} | F_{23} |
|-----------|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 1,000 a 1,056 | -0,042 | 0,550 | -0,044 | -0,120 | 0,138 | -0,034 |
| 2 | 1,056 a 1,253 | 0,261 | 0,559 | -0,243 | -0,019 | 0,083 | -0,081 |
| 3 | 1,253 a 1,586 | 0,481 | 0,460 | -0,354 | 0,077 | 0,006 | -0,116 |
| 4 | 1,586 a 2,134 | 0,825 | 0,187 | -0,532 | 0,172 | -0,050 | -0,151 |
| 5 | 2,134 a 3,230 | 1,102 | -0,299 | -0,586 | 0,350 | -0,398 | -0,171 |
| 6 | 3,230 a 5,980 | 1,226 | -0,451 | -0,617 | 0,444 | -0,949 | -0,073 |
| 7 | 5,980 a 10,080 | 1,367 | -0,838 | -0,655 | 0,431 | -1,750 | 0,094 |
| 8 | 10,080 a ∞ | 0,978 | -0,812 | -0,393 | 0,335 | -2,160 | 0,186 |

Com as equações acima se pode calcular a irradiação total horária terrestre para uma superfície horizontal ($\beta = 0$) ou inclinada, assim como, o valor individual de todas as suas componentes. Se quisermos a irradiação diária para estas basta fazer o somatório de todas as horas calculadas para o dia, por exemplo, se quisermos a irradiação diária total para uma superfície inclinada:

$$H_{r\beta} = \sum^{dia} I_{r\beta} \quad (A1.55)$$

$$H_{b\beta} = \sum^{dia} I_{b\beta} \quad (A1.56)$$

$$H_{d\beta} = \sum^{dia} I_{d\beta} \quad (A1.57)$$

calcula-se a irradiação diária da componente refletida, direta e difusa, conforme as equações (A1.55), (A1.56) e (A1.57) respectivamente, e após aplicamos a equação (A1.58);

$$H_{\beta} = H_{r\beta} + H_{b\beta} + H_{d\beta} \quad (\text{A1.58})$$

4. Influência do espectro solar (sobre uma célula de silício)

Na Figura A1.8 se observa a curva do espectro solar para uma determinada massa de ar (AM 1,5) e a resposta espectral da célula silício para esta condição de contorno.

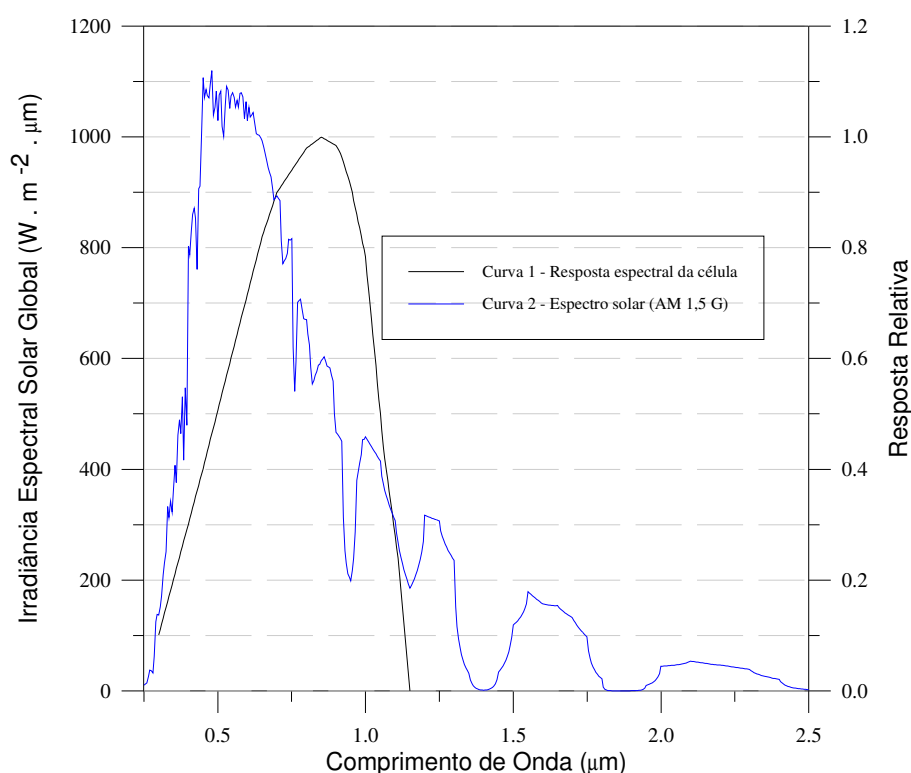


Figura A1.8 Resposta espectral de uma célula de silício e espectro solar.

(Fonte: Hecktheuer, 2001)

A radiação solar atravessa no decorrer do dia massas de ar de diferentes espessuras, e é dependente do ângulo zenital e de outros parâmetros atmosféricos, conseqüentemente, a resposta espectral do sistema fotovoltaico irá variar durante o mesmo período e sofrer esta influência em seu rendimento.

Uma equação simples para determinar a massa óptica relativa (m_r) é a que segue

$$m_r = 1 / \cos \theta_z \quad (\text{A1.59})$$

onde θ_z é o ângulo de zênite, esta fórmula apresenta um erro de 0,25% até $\theta_z = 60^\circ$ e de 10% até $\theta_z = 85^\circ$ (a refração da atmosfera e curvatura da Terra foram desprezadas).

Uma equação apresentada por Kastem e Young, 1989, que é baseada em uma atmosfera padrão, com variação de densidade, a massa de ar real, é a seguinte:

$$m_{real} = \left[\cos \theta_z + 0,50572 \cdot (96,07995 - \theta_z)^{-1,6364} \right]^{-1} \quad (\text{A1.60})$$

onde a incerteza é de 0,1% para valores até $\theta_z = 86^\circ$ e 1,25% até valores de $\theta_z = 89,5^\circ$, é válida para pressão atmosférica de 101325Pa no nível do mar, para outras altitudes deve ser corrigida conforme a equação (A1.61) [Hecktheuer, 2001],

$$m_{ajustada} = m_{real} \cdot (p/101325) \quad (\text{A1.61})$$

onde p é a pressão em Pa do local e $m_{ajustada}$ é a massa de ar ajustada para nova altitude local. Na Figura A1.9 se visualiza a variação da massa de ar em função do ângulo de incidência.

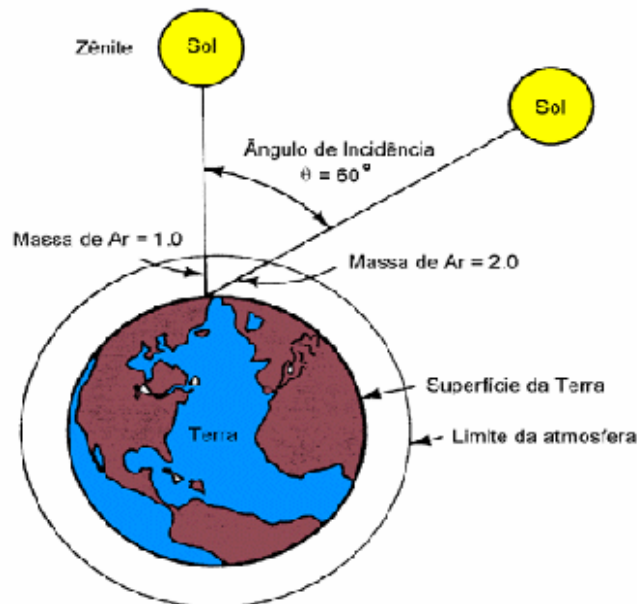


Figura A1.9 Massa de ar depende do ângulo de incidência θ_z . (Fonte: CRESESB)

APÊNDICE II

1. O microcontrolador (μ C) 8051

O microcontrolador é chamado de computador de um só *chip*, ele reúne num só circuito integrado todas as funções de processamento e de controle de um microcomputador. Tais como, unidade de aritmética e lógica, memórias, controle de portas de entrada e saída, temporizadores, conversor analógico-digital, canais de comunicação e etc.

Na placa de controle do seguidor solar foi utilizado o microcontrolador (μ C) AT89S52 da ATMEL, que corresponde ao 8051 da INTEL, mas com a vantagem de possuir memória interna para gravação do programa de controle do sistema. A pinagem do μ C é ilustrada na Figura A2.1 e suas principais características são as seguintes:

- Quatro portas de IO, 8 bits cada (8 pinos para cada porta).
- 8 kbytes de memória interna (para programação, tabelas, etc.).
- 256 bytes de memória RAM (uso geral).
- Três temporizadores de 16 bits.
- Oito fontes de interrupções.
- Frequência de operação até 33MHz.
- Canal de comunicação serial.
- Sistema contra travamento (*Watchdog timer*).

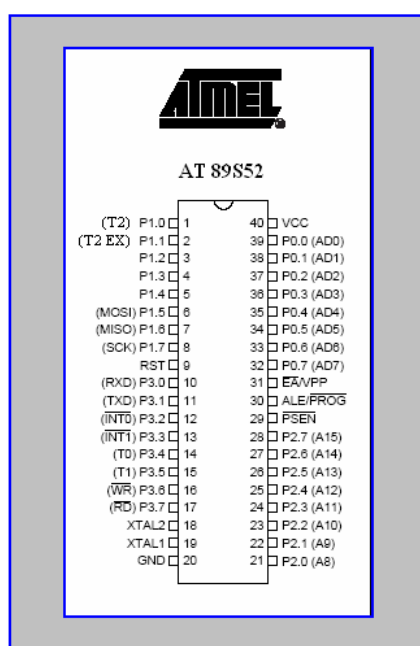


Figura A2.1 Pinagem do μ C AT89S52

2. Placa do protótipo e esquema eletrônico do controlador

Na Figura A2.2 é visualizada a placa de controle eletrônico do seguidor solar. O circuito eletrônico foi montado em uma placa de circuito impresso padrão. Também são assinalados na figura, os principais componentes eletrônicos utilizados na montagem.

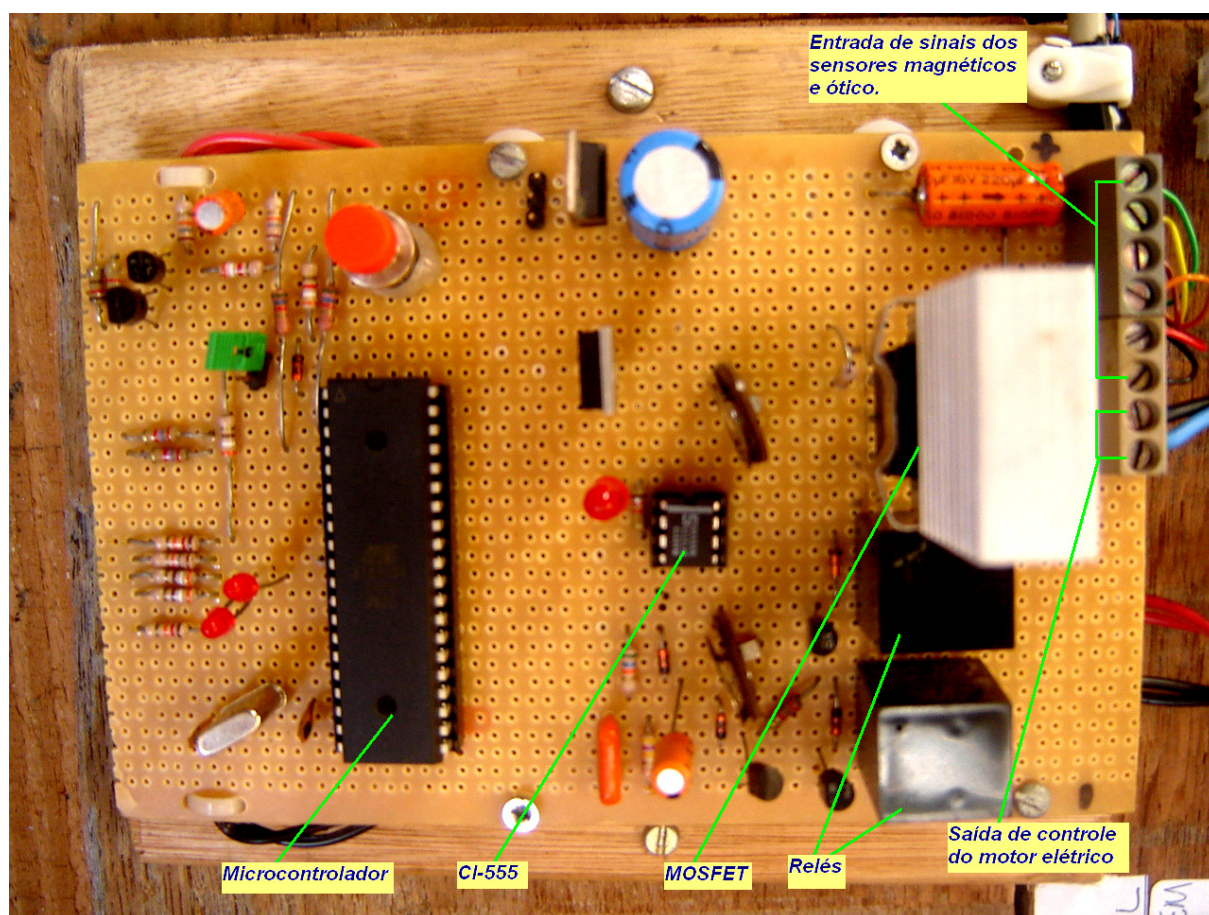


Figura A2.2 Placa de controle eletrônico

A figura A2.3 mostra o esquema elétrico do circuito de controle do seguidor azimutal.

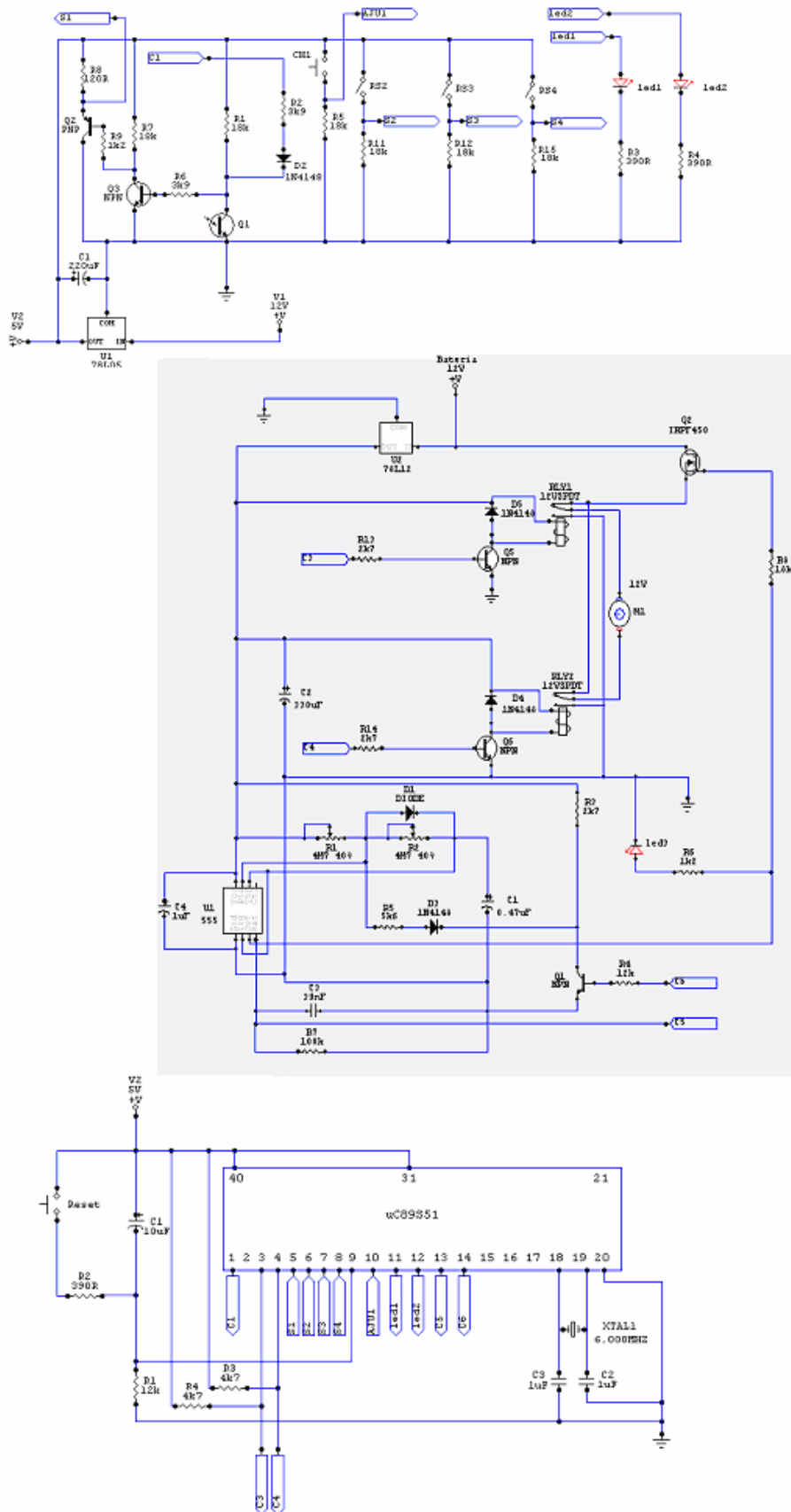


Figura A2.3 Esquema elétrico do circuito de controle.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)