



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA E INSTITUTO DE MATEMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MECATRÔNICA

ITÃ TEODORO DA SILVA

**Desenvolvimento de um sistema mecatrônico para posicionamento de
um painel fotovoltaico e comparação com painel fixo**

Salvador
2010

ITÃ TEODORO DA SILVA

Desenvolvimento de um sistema mecatrônico para posicionamento de um painel fotovoltaico e comparação com painel fixo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Mecatrônica, Escola Politécnica e Instituto de Matemática, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe

Co-orientador: Prof. Dr. Denis Gilbert Francis David

Salvador
2010

S586 Silva, Itã Teodoro

Desenvolvimento de um sistema mecatrônico para posicionamento de um painel fotovoltaico e comparação com painel fixo / Itã Teodoro da Silva. – Salvador, 2010.

78 f. : il. color.

Orientadores: Prof. Doutor Iuri Muniz Pepe

Prof. Doutor Denis Gilbert Francis David

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2010.

1. Geração de energia fotovoltaica. 2. Energia solar. 3. Coletores solares. 4. Energia - Fontes alternativas. I. Pepe, Iuri Muniz. II. David, Denis Gilbert Francis. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD.: 629.89

TERMO DE APROVAÇÃO

ITÃ TEODORO DA SILVA

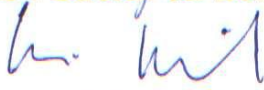
**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA MECATRÔNICO
PARA POSICIONAMENTO DE UM PAINEL
FOTOVOLTAICO E COMPARAÇÃO COM PAINEL FIXO**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em Mecatrônica do Programa de Pós-graduação em Mecatrônica-PPGM da Escola Politécnica e Instituto de Matemática da Universidade Federal da Bahia – UFBA.

Salvador, 27 de Agosto de 2010



Iuri Muniz Pepe - Orientador
Doutor em Física Nuclear, Universidade Católica de Louvain - Bélgica
Universidade Federal da Bahia



Denis Gilbert Francis David - Co-orientador
Doutor em Espectroscopia Atômica, Universidade de Caen - França
Universidade Federal da Bahia



Germano Pinto Guedes
Doutor em Engenharia Nuclear, Universidade do Rio de Janeiro
Universidade Estadual De Feira de Santana

Augusto Cesar Pinto Loureiro da Costa
Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina
Universidade Federal da Bahia

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos são muitos. Ainda bem.

A dona Maurina, mãe querida, que tanto torceu por mim, me incentivou, me ajudou e me apoiou nos momentos difíceis.

Aos meus irmãos Jumara e Segundo que me deram total apoio e orientações.

A Ana, que me acompanhou e me ajudou nessa jornada.

Ao professor Iuri Pepe, que além admirar profundamente, tenho hoje com amigo.

Ao professor Denis David, sempre tão atencioso e paciente comigo.

A todos os integrantes do LaPO, em especial, Marcus Vinícius, Vitor Pinheiro e Luiz Simões, que me ajudaram bastante na construção do sistema.

Aos Acionistas dos Rock, que sem eles teria enlouquecido.

A UFBA, por ser a Universidade Federal da Bahia

A CAPES pelo apoio financeiro importantíssimo.

A Deus.

Obrigado, obrigado e obrigado!!!

It's a long way
To the top
If you wanna
Rock and Roll!

AC/DC, 1976

RESUMO

Uma parcela da população brasileira vive em comunidades rurais isoladas sem acesso a rede de distribuição de energia elétrica. Como as concessionárias de energia elétrica alegam a inviabilidade econômica para instalar linhas de transmissão para abastecer essas comunidades, instituições e órgãos, como o Ministério de Minas e Energias, apóiam pesquisas para desenvolvimento de sistemas de geração de energias renováveis como eólica, biomassa, solar, etc., que sejam economicamente viáveis para abastecer de energia elétrica e promover o desenvolvimento econômico e social dessas localidades. No campo da energia solar, materiais semicondutores, usados na fabricação de células solares, e sistemas de rastreamento solar vêm sendo estudados e desenvolvidos visando aumentar a eficiência na geração de energia elétrica por parte dos painéis solares. Nesse trabalho foi desenvolvido um sistema mecatrônico capaz orientar um painel solar utilizando um algoritmo que calcula a trajetória do Sol a cada instante do ano. O sistema é constituído de dois eixos de rotação que, individualmente, são responsáveis pela movimentação diária e anual do painel rastreando o Sol. Tal configuração possibilitou o desenvolvimento de um protótipo simples, tanto no que diz respeito ao algoritmo de controle, quanto na sua eletromecânica. Foi feita a comparação entre as eficiências elétricas do sistema móvel construído e de um painel fixo, expostos as mesmas condições de insolação, e verificado um aumento médio na geração de energia elétrica de $39 \pm 4\%$. A análise de custos mostrou que o gasto suplementar com o protótipo mecanizado e instrumentado é 6% menos custoso, quando comparado ao sistema fixo, o que indica sua viabilidade econômica. Tais resultados confirmam a importância do investimento em pesquisa no aumento da geração de energia elétrica através sistemas de painéis solares fotovoltaicos que rastreiam o Sol e a possibilidade da implantação desse tipo de sistema em localidades desassistidas pelas concessionárias de distribuição elétrica, promovendo assim um maior desenvolvimento social e econômico local.

Palavras-chave: Rastreador solar, Ganho energético, Painel fotovoltaico, Energia solar

ABSTRACT

An expressive mount of the Brazilian people lives in insolated countryside communities having no access to the electric power networks. As private electric companies claim the economical impossibility of supplying those communities on electric power, institutions and organizations such as the Brazilian Ministry of Mines and Energy, support research on developing remote systems to generate renewable energy (based on wind, biomass, solar radiation, etc.), that are economically feasible and capable to promote the economic and social development of those regions. On solar energy, semiconductor materials used on solar cells production and solar tracking systems are being study and developed to increase efficiency on electricity generation by solar panels. In this work is reported the development of a mechatronics system capable of solar tracking by real time solar panel positioning, the system uses an algorithm to calculate the sun trajectory during the whole year. The tracking device has two axes of rotation, which individually are responsible for handling daily and annual sun tracking. The adopted construction philosophy and configuration allowed the development of a simple and low price prototype, respect to the control algorithm, as well as the used electromechanical hardware. A comparison was made between the efficiencies of the built mobile system and a fixed panel, both exposed to the same sunlight conditions, the average results show an increasing of $39 \pm 4\%$ in the electric power generation. The cost analysis showed a price increasing of 6% for the mechanized and instrumented prototype, when compared to the fixed solar panel, which indicates its economic viability. These results confirm the importance of investing in research to optimize sun tracking solar systems, as well as the possibility of adopting such technological solution in settlements unattended by electric power distribution companies, thereby promoting social and economic progress.

Key-words: Solar Tracking, Energy gain, Photovoltaic panel, Solar energy,

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1	Representação do espectro solar	20
Figura 2.2	Curva de corpo negro	22
Figura 2.3	Irradiância solar a 1 UA do Sol – Constante solar	22
Figura 2.4	Influência da atmosfera terrestre na radiação solar incidente	23
Figura 2.5	Representação do ângulo horário (ω)	25
Figura 2.6	Gráfico representando ângulo horário em função do tempo solar	26
Figura 2.7	Representação do ângulo de declinação	26
Figura 2.8	Representação do ângulo de declinação em função do dia do ano	27
Figura 2.9	Representação da posição solar durante o movimento de translação	28
Figura 2.10	Curva da equação do tempo	30
Figura 2.11	A esquerda um tarugo de silício monocristalino após CZ e a direita <i>waffers</i> de silício	34
Figura 2.12	Célula solar de silício monocristalino	34
Figura 2.13	Célula solar de silício policristalino	35
Figura 2.14	Célula solar de silício amorfo	36
Figura 2.15	Diagrama de uma junção PN	38
Figura 2.16	Porção do espectro solar não aproveitado para conversão elétrica	38
Figura 2.17	Diagrama de um sistema autônomo	40
Figura 2.18	Diagrama de um sistema híbrido	40
Figura 2.19	Diagrama de um sistema interligado	41
Figura 2.20	Curva característica de uma célula fotovoltaica	42
Figura 2.21	A esquerda: influencia da diminuição da insolação; a direita: influência do aumento da temperatura	42
Figura 2.22	Diagrama sobre a influência da inclinação da radiação incidente sobre o painel. Efeito cosseno	44
Figura 2.23	Exemplo de rastreador passivo	45
Figura 2.24	Exemplo de rastreador passivo utilizando LDR como sensor de avaliação da direção de maior insolação	46
Figura 2.25	Exemplo de rastreador passivo utilizando processo de convecção de um gás para movimentar o painel	46
Figura 2.26	Rastreador de eixo horizontal	47
Figura 3.1	Diagrama de bloco dos painéis solares móvel e fixo e as etapas de controle e aquisição de dados	53
Figura 3.2	Diagrama de bloco dos resistores de carga junto ao dissipador de calor ligado ao ADC	54
Figura 3.3	Fotografia do painel fixo e sua estrutura	57
Figura 3.4	Fotografia do painel móvel e sua estrutura	57
Figura 3.5	Fotografia em detalhe do sistema de contrapesos e eixos de rotação que promovem sua orientação	58
Figura 3.6	Fotografia de montagem no circuito de potência utilizado para o acionamento dos motores	59
Figura 3.7	Fotografia da placa de aquisição	60

Figura 3.8	Fotografia da caixa de montagem com os conectores em seu painel frontal	60
Figura 3.9	Curva de calibração de ω para $\delta = -36^\circ$ e $\delta = -30^\circ$	62
Figura 3.10	Curva de calibração de ω para $\delta = -25^\circ$ e $\delta = -20^\circ$	62
Figura 3.11	Curva de calibração de ω para $\delta = -15^\circ$ e $\delta = -10^\circ$	62
Figura 3.12	Curva de calibração de ω para $\delta = -5^\circ$ e $\delta = 0^\circ$	63
Figura 3.13	Curva de calibração de δ	63
Figura 3.14	Curvas de calibração dos ADC	63
Figura 3.15	Imagem de interface do programa de controle do sistema de rastreamento solar	64
Figura 3.16	Fluxo do programa de rastreamento solar	65
Figura 4.1	Gráfico de potência gerada pelos painéis ao longo do dia 15/02/2010 ..	66
Figura 4.2	Gráfico de potência gerada pelos painéis ao longo do dia 16/02/2010 ..	67
Figura 4.3	Gráfico de potência gerada pelos painéis ao longo do dia 18/02/2010 ..	68
Figura 4.4	Gráfico de potência gerada pelos painéis ao longo do dia 22/02/2010 ..	68
Figura 4.5	Gráfico de potência gerada pelos painéis ao longo do dia 27/02/2010 ..	69
Figura 4.6	Gráfico de potência gerada pelos painéis ao longo do dia 28/02/2010 ..	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Percentual de faixa de comprimento de onda e energia eletromagnética	22
Tabela 2 – Coeficientes da EOT ..	31
Tabela 3 – Característica do motor tipo <i>shunt</i> , <i>compound</i> e série	50
Tabela 4 – Diferença percentual entre as energias captadas pelos painéis	70
Tabela 5 – Tabela de custos de construção do sistema móvel	71
Tabela 6 – Tabela de custos de construção do sistema fixo	72

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	13
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
2.1	CARACTERÍSTICAS E ESTRUTURA DO SOL 16
2.1.1	Massa 16
2.1.2	Raio 16
2.1.3	Núcleo 17
2.1.4	Camada Radiativa 17
2.1.5	Fotosfera 17
2.1.6	Cromosfera 18
2.1.7	Coroa 18
2.1.8	Luminosidade 18
2.1.9	Temperatura 18
2.2	ENERGIA SOLAR 19
2.2.1	Distribuição espectral do fluxo solar extraterrestre 19
2.2.2	Constante solar 21
2.2.3	Influência da atmosfera 22
2.3	POSICIONAMENTO E MOVIMENTAÇÃO SOL-TERRA 24
2.3.1	Distância – UA 24
2.3.2	Eclíptica 24
2.3.3	Equador celeste 24
2.3.4	Zênite 24
2.3.5	Coordenadas geográficas 25
2.3.6	Ângulo horário 25
2.3.7	Declinação 26
2.3.8	O tempo 27
2.3.9	O dia solar 27
2.3.10	O dia sideral 28
2.3.11	Rotação 28
2.3.12	Translação 28
2.3.13	Os fusos horários 29
2.3.14	Horário de verão 29
2.3.15	Hora solar 29
2.3.16	Equação do tempo 30
2.4	COLETORES DE RADIAÇÃO SOLAR 31
2.4.1	Células solares 32
2.4.1.1	<i>O que são células solares</i> 32
2.4.1.2	<i>Características dos tipos de células solares mais comuns</i> 32
2.4.1.3	<i>Como funciona a conversão fotovoltaica</i> 37

2.4.2	O sistema fotovoltaico	38
2.4.2.1	<i>Inversores de corrente</i>	39
2.4.2.2	<i>Acumuladores (banco de baterias)</i>	39
2.4.2.3	<i>Controle de carga</i>	39
2.4.2.4	<i>Sistemas autônomos, híbridos e interligados a rede</i>	40
2.4.2.5	<i>O módulo fotovoltaico</i>	41
2.4.2.6	<i>Características elétricas dos módulos fotovoltaicos</i>	41
2.4.3	Rastreamento solar	43
2.4.3.1	<i>Painéis fixos</i>	45
2.4.3.2	<i>Rastreadores passivos</i>	45
2.4.3.3	<i>Rastreadores de eixo polar</i>	47
2.4.3.4	<i>Rastreadores de eixo horizontal</i>	47
2.4.3.5	<i>Rastreadores de eixo vertical</i>	48
2.4.3.6	<i>Rastreadores ativos</i>	48
2.4.4	Atuadores eletromecânicos (motores elétricos)	48
2.4.4.1	<i>Aspectos construtivos</i>	49
2.4.4.2	<i>Potência do motor CC</i>	51
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS		52
3.1	LOCALIZAÇÃO DO LABORATÓRIO	52
3.2	DESCRIÇÃO DO SISTEMA	52
3.2.1	Painéis coletores	53
3.2.2	Módulo de controle	58
3.2.3	Programa de controle e aquisição de dados	61
CAPÍTULO 4 RESULTADOS		66
4.1	ANÁLISE DE DADOS	66
4.2	ANÁLISE DE CUSTOS	71
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES		73
PERSPECTIVAS		75
REFERÊNCIAS		76

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

As fontes de energia mais comuns, como a hidráulica, biomassa, eólica, petróleo e seus derivados, são formas indiretas de energia solar, entretanto, isso não significa que a radiação solar não possa ser aproveitada de forma direta para aquecimento de ambientes, geração de potência mecânica, ou ainda, na geração de energia elétrica por meio de efeito fotovoltaico.

O emprego da energia solar para iluminação natural e aquecimento de ambientes pode ser feito com o auxílio de técnicas de arquitetura e construção civil. Trata-se do aproveitamento dos raios solares para iluminar e aquecer o interior de edificações, reduzindo assim a necessidade de lâmpadas e aquecedores.

A radiação solar também pode ser aproveitada com o uso de coletores solares. Esses são empregados no aquecimento de água em instalações como hospitais, restaurantes, hotéis, residências, sistemas para secagem de grãos, etc. Os concentradores possuem a capacidade de produzir vapor pelo aquecimento de água que, com o auxílio de uma turbina, gerar eletricidade.

A conversão direta da energia solar em energia elétrica mais comumente usada está baseada no efeito fotovoltaico, quando a radiação solar é convertida em energia elétrica por meio do uso de células solares feitas de materiais semicondutores.

Segundo dados do Atlas Solarimétrico do Brasil (Tiba, 2000) o país possui um potencial energético solar excelente. Por exemplo, a região que circunscreve o Ceará, Mato Grosso, passando por Piauí, Pernambuco, Bahia, Goiás, Minas Gerais, conta com uma radiação solar global diária média de 18 MJ/m^2 . No entanto, a geração de energia solar fotovoltaica contribui com uma parcela mínima, menor que 1%, na matriz energética brasileira. Isso ocorre em função dos altos custos de implantação dos sistemas fotovoltaicos, quando comparado ao sistema de geração de energia por usinas hidrelétricas, que são responsáveis pela maior parcela da energia elétrica brasileira.

Ainda assim, segundo o Ministério de Minas e Energias (MME), existem vários projetos em curso ou em operação com o apoio técnico, científico e financeiro de diversos órgãos e instituições brasileiras, como o próprio MME, Eletrobrás/CEPEL, Universidades, entre outros, principalmente pela implantação de sistemas fotovoltaicos de geração de eletricidade, visando o abastecimento de comunidades isoladas das redes de eletrificação urbana e rural e, por conseguinte, o desenvolvimento regional.

O nordeste brasileiro é uma região de grande potencial energético solar, com sub-regiões onde não há abastecimento de energia elétrica. O motivo alegado pelas autoridades governamentais e pelas próprias concessionárias é a inviabilidade econômica de levar energia elétrica por linhas de transmissão para tais localidades remotas, tendo em vista o custo de tais instalações. Surge então a necessidade de se estudar formas alternativas e viáveis de abastecer de energia elétrica essas sub-regiões.

Se for observada a taxa de insolação dessa região do Brasil, coletar energia dos raios solares e transformá-la em energia elétrica é uma oportunidade no combate a pobreza e a desigualdade social e econômica entre as regiões do país (Fraidenraich, 2002). A energia elétrica gerada a partir da captação de energia solar pode ser usada na agricultura, alimentando diretamente sistemas de bombeamento de água, pequenas indústrias rurais, alimentando fornos, equipamentos de refrigeração, processamento, ou ainda alimentando sistemas de telefonia, iluminação pública, etc.

Pesquisas vêm sendo realizadas na tentativa de aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos na conversão de energia, com ênfase no desenvolvimento de novos materiais usados na produção das células solares.

Outra técnica utilizada para um maior aproveitamento da energia solar é o uso de rastreadores solares. Esses sistemas têm como objetivo acompanhar a trajetória aparente do Sol a fim de manter a área ativa do conjunto dos painéis fotovoltaicos perpendicular à direção de incidência da radiação solar, aumentando assim a potência gerada pelos painéis. Diferentes resultados que aparecem na literatura demonstram a viabilidade dessa técnica aumentando o ganho na conversão de energia em até 40%.

Esse trabalho descreve a tentativa de aumentar a eficiência de coleta de energia solar usando um painel fixado a um sistema móvel capaz de acompanhar o Sol no seu movimento diário. Para isso foram utilizados algoritmos que calculam a trajetória do Sol e controlam a orientação do painel.

A movimentação do painel foi feita por dois eixos de rotação, sendo um deles responsável pela movimentação diária e o outro responsável por seguir o movimento anual do Sol, o que permitiu uma simplificação, tanto no sistema eletromecânico, quanto no algoritmo de controle.

Para a avaliação da eficiência do sistema móvel, os resultados de geração de energia foram comparados com um sistema semelhante, sujeito às mesmas condições de operação, porém fixo e com orientação ótima.

A partir dos resultados obtidos foi discutida a viabilidade da implantação desse tipo de sistema, fazendo uma análise dos custos e avaliando se a utilização do rastreador solar compensa, quando comparada ao sistema fixo.

CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica, ou seja, uma análise da literatura especializada sobre os elementos envolvidos e pertinentes aos objetivos desta dissertação.

2.1 CARACTERÍSTICAS E ESTRUTURA DO SOL

O Sol é a estrela mais próxima do planeta Terra e a que melhor conhecemos. Por estar tão próxima, se comparada com as distâncias das outras estrelas, suas propriedades podem ser estudadas com grau de detalhamento inatingível para as demais. Por essa razão os conhecimentos adquiridos através dele nos possibilitam obter conhecimentos sobre estrelas em geral.

Em primeira aproximação, o Sol pode ser considerado como uma enorme estrela de gás incandescente em cujo núcleo ocorrem reações termo-nucleares envolvendo hidrogênio e gerando assim uma enorme quantidade de energia que é, de forma ininterrupta, emitida na forma de radiação eletromagnética em todas as direções do espaço.

O Sol como qualquer outro corpo ou objeto celeste possui suas características peculiaridades que o distingue dos demais.

2.1.1 Massa

A massa solar pode ser determinada, desprezando-se o efeito dos outros corpos do sistema solar, conhecendo-se a unidade astronômica e com a ajuda da terceira lei de Kepler

$$\frac{d^3}{T^2} = \frac{GM_S}{4\pi^2} \times \left(1 + \frac{m}{M_S}\right) \quad (2.1)$$

que relaciona o semi-eixo maior da órbita do planeta (d) com o período de translação (T). Na Equação (2.1) acima, m e M_S são respectivamente as massas do planeta e do Sol, e G é a constante gravitacional universal, $G = 6,672 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$. A massa solar vale então $M_S = 1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$.

2.1.2 Raio

O diâmetro angular do disco do Sol na luz branca (ou natural) é de 32' de arco, quando medido da Terra, a 1 UA de distância. Conhecendo-se o valor de 1 UA em km, obtém-se que o raio do Sol é $R_S = 696.260 \text{ km}$. De posse do seu raio e massa é fácil verificar que a densidade média do Sol é $1,408 \text{ g/cm}^3$, 40% maior que da água, e sua aceleração da

gravidade na superfície é 274 m/s^2 , cerca de 28 vezes mais intensa do que na superfície da Terra.

2.1.3 Núcleo

Esta parte mais interna da estrela está à temperatura da ordem de 8 milhões de Kelvins, sendo a região onde energia é produzida através de fusões termo-nucleares. Quando duas partículas nucleares ou núcleos se fundem, energia é liberada, pois o produto dessa reação nuclear tem massa menor que a soma das massas das partículas originais. A principal reação de fusão termo-nuclear que ocorre no interior do Sol é aquela onde quatro prótons se associam formando um núcleo hélio e liberando dois pósitrons, dois neutrinos, dois nêutrons e energia. Nessa transmutação química de hidrogênio em hélio, uma pequena quantidade de massa é convertida em energia, de acordo com a equação de Einstein, $E = mc^2$, o que dá conta da prodigiosa energia liberada pelo Sol. A cada segundo 4,7 milhões de toneladas de matéria deixam de existir ao se transformarem em energia.

2.1.4 Camada radiativa

Fora da região central, numa camada com espessura de $(2/5)R_s$, a energia proveniente do núcleo do Sol, na forma de fótons energéticos, vai pouco a pouco sendo drenada para fora. A densidade nessa região é comparável a da água e suficientemente alta para que os fótons encontrem obstáculos para caminhar. Estes bósons depois de percorrerem alguns centímetros acabam sendo absorvidos pela matéria que compõem esta camada, para depois serem re-emitidos em outras direções e comprimentos de onda. Pelo fato da temperatura decrescer de dentro para fora, a difusão de fótons para fora é maior que para dentro, dando lugar a um fluxo radioativo líquido para fora desta camada. Essa camada é denominada camada radiativa.

2.1.5 Fotosfera

A camada superficial e visível do Sol é chamada de fotosfera. Com espessura da ordem de 330 km, sua temperatura chega a 5.800 K. Um fenômeno notável ocorrido na fotosfera é o das manchas solares, regiões escuras com temperaturas em torno de 3.800 K. Nelas aparece um forte campo magnético, 50.000 vezes mais intenso do que o presente nos pólos magnéticos da Terra. Por causa desse campo, a mancha é até 2.000 K mais fria do que a fotosfera circundante, portanto mais escura. Até agora não se sabe ao certo como o campo magnético atua na mancha, de modo a torná-la mais fria. Uma sugestão, é que ele inibe o

transporte convectivo. O número de manchas solares varia ciclicamente com periodicidade média de 11,2 anos (Filho, et al., 2004).

2.1.6 Cromosfera

A cromosfera pode ser observada durante os eclipses, quando a Lua esconde o disco da fotosfera. Ela tem uma aparência ondulada devido a estruturas chamadas espículas, jatos de gás que se elevam a até 1.000 km acima da borda da cromosfera e que duram poucos minutos.

2.1.7 Coroa

Gradualmente a cromosfera se funde na coroa que é a camada mais externa e mais rarefeita da atmosfera do Sol e também pode ser vista durante os eclipses. Atualmente sabe-se que ela é composta por átomos de ferro, níquel, neônio e cálcio altamente ionizados. O fato de existirem esses elementos várias vezes ionizados na coroa implica que sua temperatura deve ser muito alta, pois é necessária muita energia para arrancar muitos elétrons de um átomo. Estima-se que a coroa está a uma temperatura em torno de 10^6 K. Dela emana o vento solar que é uma extensão dinâmica da coroa. Os principais constituintes do vento solar são: elétrons e prótons, em quantidades iguais, e partículas α (núcleos de hélio) na proporção de 3 a 4% dos elétrons (Matsuura, et al., 2006).

2.1.8 Luminosidade

O Sol constantemente emite radiação eletromagnética (fótons), vento solar, campo magnético e neutrinos, ou seja, energia sob diversas formas. Porém a maior parte é liberada sob forma de luz visível e radiação infravermelha. A luminosidade do Sol ou de uma lâmpada incandescente, por exemplo, é medida como a quantidade de energia que é liberada sob forma de radiação eletromagnética por unidade de tempo. A luminosidade do Sol é $L_S = 3,85 \times 10^{26}$ W.

2.1.9 Temperatura

De posse da luminosidade e do raio solar, é possível obter a temperatura efetiva do Sol que é 5.777 K, essa é a temperatura da sua superfície o que lhe confere uma cor branca.

2.2 ENERGIA SOLAR

O Sol, fonte de energia inesgotável para Terra, fornece por ano da ordem de $1,5 \times 10^{18}$ kWh. Esse valor corresponde a 10.000 vezes o consumo mundial de energia durante o mesmo período (ANEEL, 2005). Além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar possui um potencial enorme para utilização por meio de captação e conversão em outras formas de energia como a energia mecânica, química, térmica e elétrica.

Aproximadamente 30% da radiação entrante é refletida sem mudança de comprimento de onda, 47% é absorvida pela atmosfera e pela superfície terrestre, provocando um aumento de temperatura, em seguida, tanto a superfície terrestre, quanto a própria atmosfera, tendem a irradiar infravermelho para o espaço. Os 23% restantes passam a ser a fonte de energia térmica que impulsiona os ventos, correntes marítimas, determinando o nosso clima (Matsuura & Picazzio, 2006).

2.2.1 Distribuição espectral do fluxo solar extraterrestre

O modelo de energia radiante é descrito como um fluxo de várias unidades discretas, que no vácuo viajam a velocidade da luz, chamadas fótons. A cada fóton é atribuído um comprimento de onda λ e uma quantidade de energia E relacionada pela expressão:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.2)$$

onde : h = constante de Planck, $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s

c = velocidade da luz, $c = 3 \times 10^8$ m/s

Os comprimentos de onda do espectro eletromagnético estão divididos em bandas ou faixas espectrais. A radiação visível ou luz visível, a qual o olho humano é sensível, se localiza aproximadamente entre 380 e 780 nm. A radiação que se encontra na faixa espectral entre 780 nm e aproximadamente 1 mm é chamada infravermelho e está subdividida em infravermelho próximo e infravermelho térmico. As ondas de irradiação com comprimentos maiores do que 1 mm são denominadas de microondas e ondas de rádio, já os intervalos de comprimentos de onda menores do que a luz visível são chamadas ultravioleta, raios X e raios gama, como mostra a Figura 2.1.

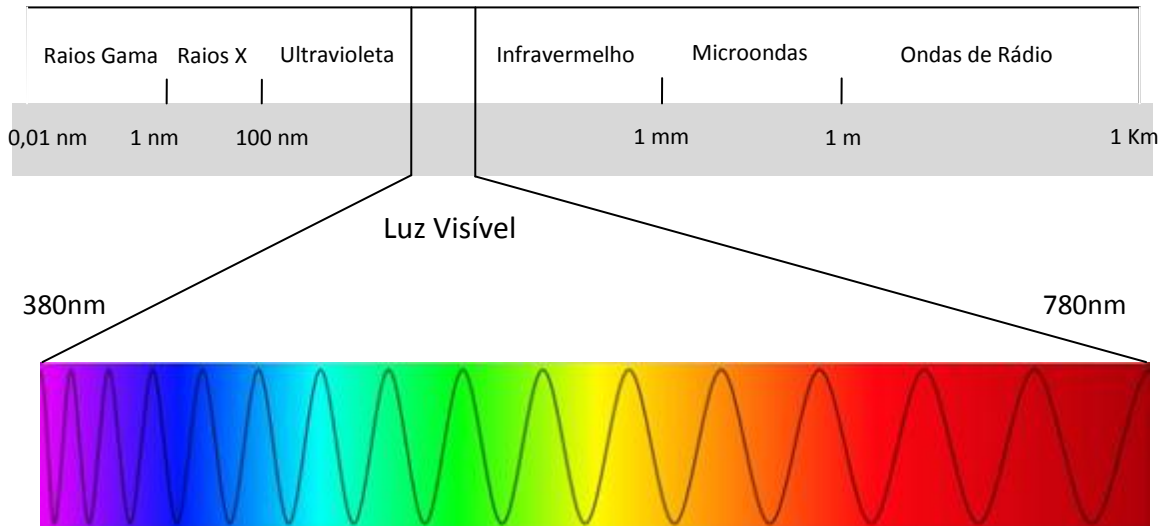


Figura 2.1 Representação do espectro eletromagnético

Denomina-se espectro solar a função distribuição da energia radiante emitida pelo Sol medida na região do espaço imediatamente antes do limite da atmosfera terrestre em função do comprimento de onda.

A faixa de comprimentos de onda do espectro eletromagnético solar se estende aproximadamente de 350 a 4000 nm. De acordo com Duffie e Beckman (1980) as diferentes faixas de comprimento de onda são responsáveis por quantidades percentuais diferentes da irradiância solar, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Percentual de faixa de comprimento de onda e energia eletromagnética

λ (nm)	0 – 380	380 - 780	780 - ∞
Percentual (%)	6,4	48,0	45,6
Energia (W/m ²)	87	656	623

Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), físico alemão, definiu um corpo negro como um objeto que absorve toda luz que incide sobre ele, sem que haja reflexão. Irradiando a energia absorvida a mesma taxa em que absorve, o corpo não altera sua temperatura (T) e permanece então em equilíbrio termodinâmico. Qualquer corpo em equilíbrio termodinâmico emitirá fótons com uma distribuição de comprimentos de onda (λ) dada pela lei de Planck

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (2.3)$$

onde h é a constante de Planck, c representa a velocidade da luz no vácuo e k a constante de Boltzmann que vale $1,38 \times 10^{-23}$ J/K. Essa radiação, chamada de radiação espectral de corpo negro (B), ou radiação térmica, não depende da direção de emissão e não é polarizada. Josef Stefan (1835-1893) e Ludwig Boltzmann (1844-1906) descobriram empiricamente que o fluxo de energia, ou radiância, de um corpo negro de temperatura T é dado por

$$I = \sigma T^4 \quad (2.4)$$

onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ W/m²K⁴ é a constante de Stefan-Boltzmann. Essa expressão, então, permite o cálculo da radiação total emitida em todas as direções e sobre todos os comprimentos de onda a partir do conhecimento da temperatura de corpo negro. A radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre provém da região da fotosfera solar, camada superficial do Sol com uma temperatura da ordem de 5.800 K. Dada a dependência entre a composição espectral e a temperatura, traduzida na chamada lei de Planck, a composição espectral da luz solar corresponde aproximadamente àquela que seria de esperar na radiação de um corpo negro aquecido a cerca de 5.800 K. A Figura 2.2 mostra a relação entre a intensidade da radiação emitida por um corpo negro em função do comprimento de onda a 6.000 K.

A intensidade da radiação na superfície do Sol é aproximadamente $6,33 \times 10^7$ W/m². Na Terra esse valor é bem menor, pois a radiação solar espalhada é inversamente proporcional ao quadrado da distância. A quantidade de energia radiante vinda do Sol, distante 1 UA, a cada segundo, depositada em uma superfície de área 1 m² e posicionada imediatamente fora da atmosfera terrestre é 1.367 W/m². Esse valor é conhecido como constante solar.

2.2.2 Constante solar

A irradiância solar, ou seja, a quantidade de energia liberada na superfície do Sol a cada segundo depositada em uma superfície de área 1 m², é aproximadamente $I_S = 6,33 \times 10^7$ W/m². Na Terra, distante 1 UA do Sol, esse valor é bem menor, como é ilustrado na Figura 2.3, pois a radiação solar espalhada é inversamente proporcional ao quadrado da distância. O valor mais aceito para a irradiância solar imediatamente fora da atmosfera terrestre é $I_0 = 1.367$ W/m² e é conhecida com constante solar (Fröhlich, et al., 1981).

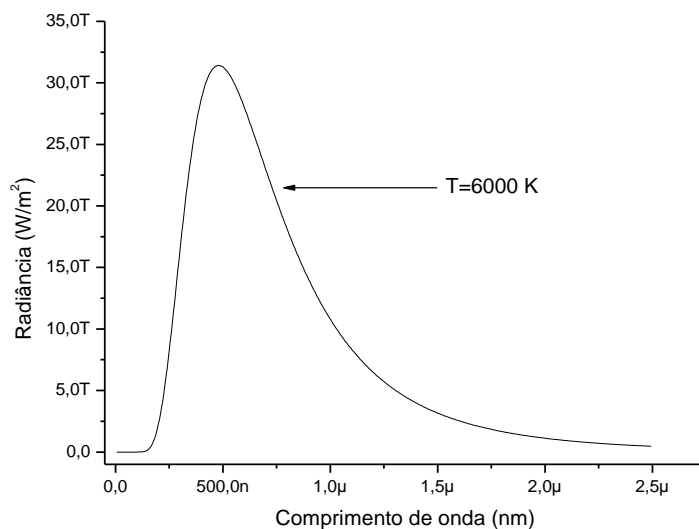


Figura 2.2 Radiação espectral de corpo negro a 6000 K

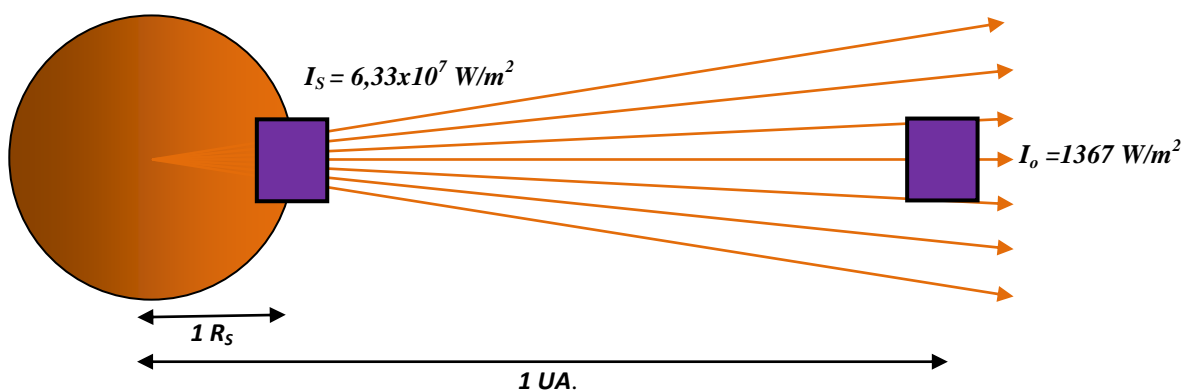


Figura 2.3 Irradiância solar a 1 UA do Sol – Constante Solar

2.2.3 Influência da atmosfera

Até chegar à superfície da Terra, a radiação solar incidente interage com a atmosfera terrestre, o que influencia sensivelmente no valor da constante solar que recebemos. As interações podem ser absorção, reflexão ou difusão, e dependem do comprimento de onda dos fótons, da composição dos gases atmosféricos e até mesmo do ângulo de incidência dos raios solares. Aproximadamente 25% da energia chega na superfície da Terra sem interagir, essa fração é chamada de radiação solar direta. Do total, em média, 30% da energia é refletida

pela camada atmosférica, pelas nuvens e pela superfície, sendo reenviada ao espaço ou reinteragindo com a atmosfera. Outra fração da radiação solar incidente encontra dificuldade para atravessar a atmosfera e é espalhada, isso causa o efeito de céu azulado durante o dia. Como os raios solares, em incidência oblíqua, atravessam uma camada mais espessa e, portanto, uma maior massa de ar, durante o amanhecer e o entardecer o comprimento de onda espalhado está na faixa do amarelado ou alaranjado, o que causa a cor característica no amanhecer e no entardecer. Todos esses fatores fazem com que a constante solar seja menor na superfície da Terra do que no topo da atmosfera. A camada de ozônio que existe na estratosfera, a 25 km de altura, absorve quase a totalidade da radiação ultravioleta, que só alcança o solo em pequenas quantidades. O vapor d'água e o dióxido de carbono, também presentes, são responsáveis pela absorção de parte da faixa infravermelha da radiação. As nuvens e partículas suspensas fazem com que a radiação seja fortemente absorvida e perca sua direção inicial. Como consequência pode-se estimar que o valor da constante solar na superfície da Terra em um dia claro de verão seja próximo de 1000 W/m^2 . A Figura 2.4 ilustra as formas de interação da radiação solar com a atmosfera.

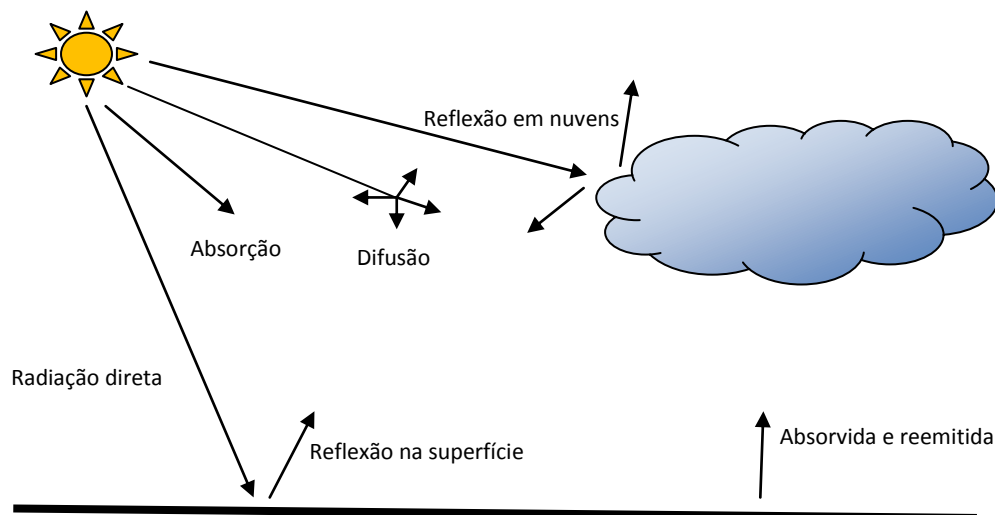


Figura 2.4 Influência da atmosfera terrestre na radiação solar incidente

2.3 POSICIONAMENTO E MOVIMENTAÇÃO SOL-TERRA

O sistema solar está em constante movimento e tudo que está presente nele participa da sua dinâmica. Com o passar das horas, os astros, que parecem estar incrustados em uma enorme esfera, chamada esfera celeste, movem-se no céu nascendo a leste e se pondo a oeste. Isso causa a impressão de que a esfera celeste está girando de leste para oeste, em torno de um eixo imaginário, que intercepta a esfera em dois pontos fixos, os pólos celestes. Na verdade esse movimento é um reflexo do movimento de rotação da Terra, em torno do seu próprio eixo, que se faz de oeste para leste. O eixo de rotação da esfera celeste é o prolongamento do eixo de rotação da Terra, e os pólos celestes são as projeções, no céu, dos pólos terrestres.

2.3.1 Distância - UA

A distância média do Sol a Terra, antes medida por métodos de triangulação e paralaxe, hoje é determinada com maior precisão por meio de instrumentos de radar. Essa distância é conhecida com 1 UA (Unidade Astronômica) e equivale a 149.597.870 km.

2.3.2 Eclíptica

Como estamos na Terra e ela é o nosso referencial inercial, temos a impressão de que o Sol é quem gira ao nosso redor. Essa crença foi sustentada durante muito tempo. Porém desde o renascimento, com cientistas como Copérnico, Galileu, Kepler entre outros, já se sabe que o movimento do Sol no céu visto da Terra é um movimento aparente, uma vez que temos a Terra como referência. A eclíptica é definida como a circunferência imaginária correspondente à trajetória aparente do Sol na esfera celeste. O eixo da eclíptica é uma reta perpendicular à ela e passa pelo centro da Terra.

2.3.3 Equador celeste

É o círculo máximo em que o prolongamento do equador da Terra intercepta a esfera celeste.

2.3.4 Zênite

É o ponto no qual a vertical do lugar intercepta a esfera celeste, acima do observador.

2.3.5 Coordenadas geográficas

Latitude geográfica é a distância angular, a partir do equador, medida ao longo do meridiano de Greenwich. Esta distância mede-se em graus, podendo variar entre 0° e 90° para norte ou para sul. O Meridiano de Greenwich é o meridiano que passa sobre a localidade de Greenwich (no Observatório Real, nos arredores de Londres, Reino Unido) e que, por convenção, divide o globo terrestre em ocidente e oriente, permitindo medir a longitude. Foi estabelecido pelo astrônomo britânico George Biddell Airy em 1851.

Longitude geográfica é a distância ao meridiano de Greenwich medida ao longo do Equador. Esta distância é medida em graus, podendo variar entre 0° e 180° para leste ou para oeste. Considerando que 0° corresponde ao meridiano de Greenwich.

2.3.6 Ângulo horário

Ângulo horário é o ângulo formado entre o meridiano do observador e o plano do meridiano que contém o Sol, como mostra a Figura 2.5. O ângulo horário ou ângulo de azimuth (ω) está relacionado com a rotação da Terra sobre seu eixo. Ao completar um dia inteiro com 24 horas ela também completou um ciclo de 360° o que significa que a Terra gira numa velocidade angular de 15° por hora. Durante o período diurno o ângulo horário pode variar de -90° a $+90^\circ$, sendo -90° ao amanhecer (6 horas), 0° ao meio dia, ponto mais alto do Sol, momento em que o plano do meridiano que o contém encontra o plano que contém o observador e $+90^\circ$ ao anoitecer (18 horas), conforme mostra o gráfico da Figura 2.6.

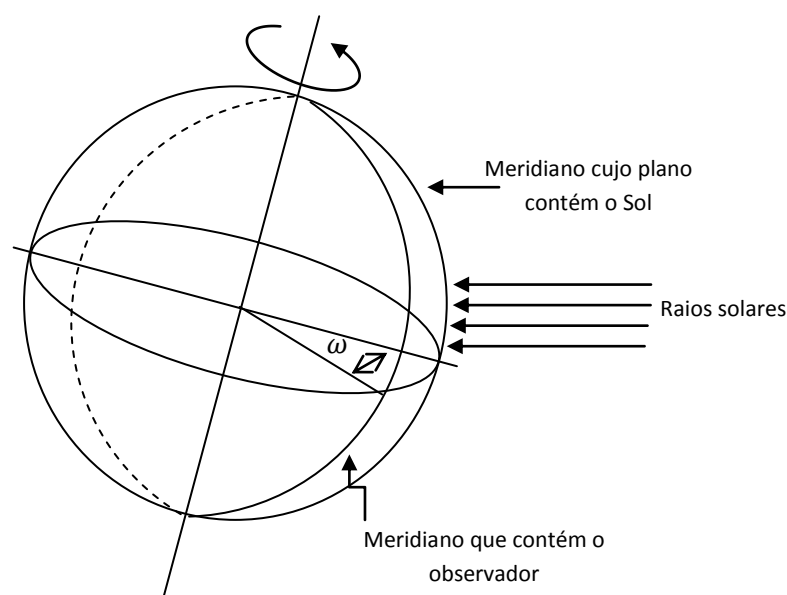


Figura 2.5 Representação do ângulo horário (ω)

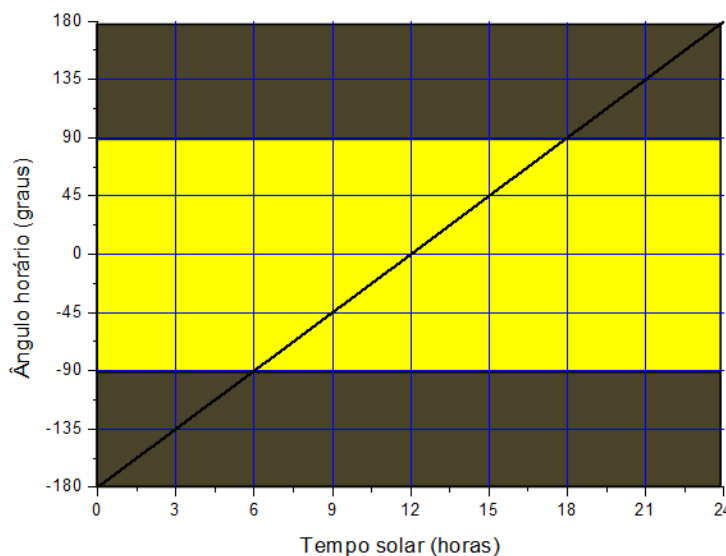


Figura 2.6 Gráfico representando ângulo horário em função do tempo solar

2.3.7 Declinação

O plano que inclui o equador da Terra é chamado de plano equatorial. Se uma linha é traçada entre o centro da Terra e o Sol, o ângulo entre esta linha e o plano equatorial é chamado de ângulo de declinação (δ). A amplitude dessa grandeza é $23,45^\circ$ e está diretamente ligada às estações do ano.

As estações do ano nos países do hemisfério Norte e Sul acontecem de forma inversa. Para os países do hemisfério sul, 22 de dezembro marca o início do verão. A declinação nesse período é de $23,45^\circ$ Sul, esta condição é chamada solstício de verão. Ao continuar se deslocando, a Terra passa por uma posição em que o Sol intercepta seu plano equatorial, isso ocorre por volta de 23 de março, condição chamada de equinócio de outono, quando $\delta = 0^\circ$. Mais tarde, por volta do dia 21 de junho, o Sol assume a posição onde $\delta = -23,45^\circ$ e dá início ao inverno. Em 23 de setembro o sol volta a interceptar o plano equatorial (equinócio de primavera) e inicia a primavera com ângulo de declinação nulo, ver Figuras 2.7 e 2.8.

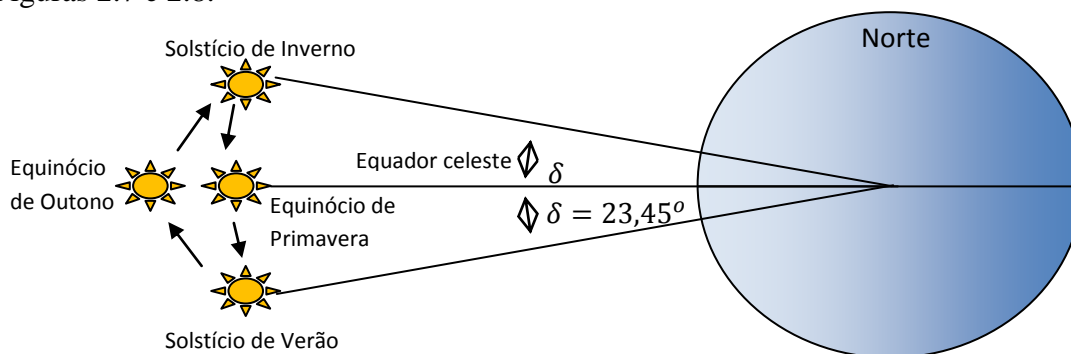


Figura 2.7 Representação do ângulo de declinação

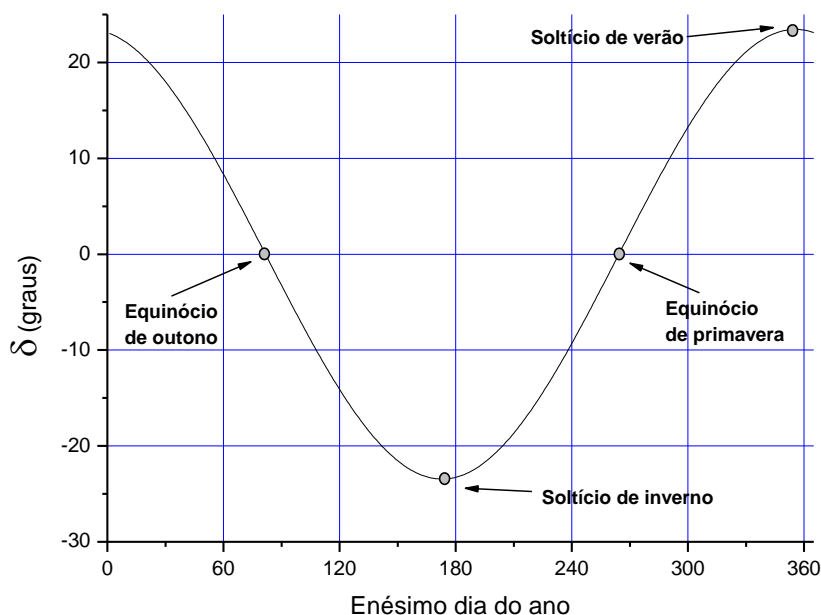


Figura 2.8 Representação o ângulo de declinação em função do dia do ano

Essa curva diz respeito a um observador situado no hemisfério sul, uma vez que por convenção a declinação negativa faz referência ao inverno.

É possível calcular o ângulo de declinação aproximado conhecendo-se o enésimo dia do ano N através da equação (Stine & Gayer, 2001; Alves, 2008)

$$\delta = \arcsen(0,39795\cos[0,98563(N - 173)]) \text{ (graus)} \quad (2.5)$$

2.3.8 O tempo

A medida do tempo é baseada no movimento de rotação da Terra quando se toma um ponto de referência, que pode ser o Sol ou outras estrelas. Como, além da rotação da Terra, este astro se move ao redor do Sol, o tempo solar é diferente do tempo sideral.

2.3.9 O dia solar

O dia solar utiliza o Sol como referência para a determinação do tempo. Nele os dias são divididos em 24 horas tomando-se como base, por exemplo, o momento em que o Sol atinge a posição máxima em relação a uma linha vertical, definindo esse momento como meio-dia. No dia solar as horas são subdivididas em 60 minutos e os minutos subdivididos em 60 segundos.

2.3.10 O dia sideral

A medida do tempo sideral é baseada no movimento de rotação da Terra quando se toma como ponto de referência estrelas fixas da esfera celeste. Como, além da rotação, a Terra se move ao redor do Sol, o dia solar é diferente do dia sideral em aproximadamente 3 minutos e 56 segundos. Assim 1 dos 365 dias do ano corresponde ao movimento de translação da Terra. Por isso $1 \text{ dia sideral} = 1 \text{ dia solar} - 1 \text{ dia solar}/365 = 23 \text{ horas } 56 \text{ minutos e } 4 \text{ segundos}$.

2.3.11 Rotação

A Terra gira com velocidade angular constante de 15° por hora em torno do seu próprio eixo que por sua vez definem o norte e o sul do planeta quando intercepta a superfície. Esse movimento define os dias, quando metade da sua superfície esta voltada para o Sol e as noites quando a outra metade não recebe a luz do Sol.

2.3.12 Translação

Translação é o movimento que a Terra faz em torno do Sol. Esse movimento se dá devido a força de gravidade que há entre esses corpos. De acordo com a primeira lei de Kepler a Terra orbita uma trajetória elíptica em torno do Sol com este posicionado em um dos focos. Existem posições em que, durante a translação, a Terra está mais próxima do Sol e a sua velocidade aumenta, essa posição chama-se periélio. Na posição da trajetória em que a Terra mais se distancia e sua velocidade é menor chamamos de afélio, Figura 2.9. No afélio e no periélio a velocidade orbital de translação da Terra é menor e maior respectivamente, portanto o tempo sideral também sofre uma pequena variação.

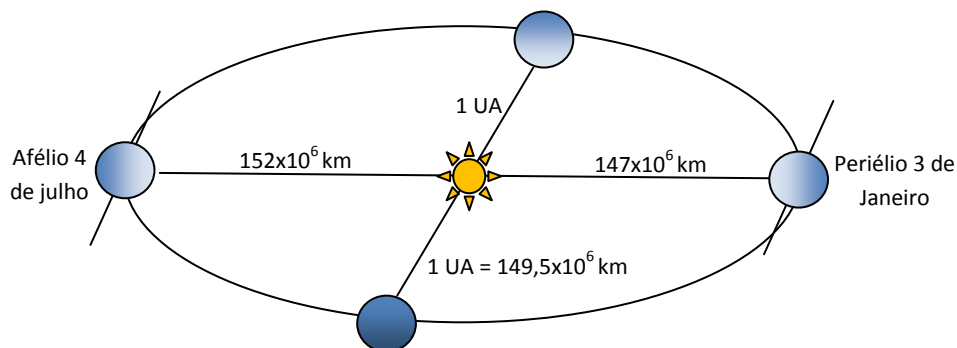


Figura 2.9 Representação da posição solar durante o movimento de translação

2.3.13 Os fusos horários

Dividindo os 360° referente a uma rotação da Terra por 24 horas, intervalo de tempo que dura um dia completo, totalizaremos 15° o que corresponde a 1 hora. O mundo possui 24 fusos que distam 15° um do outro ou 1 hora. Cada um desses fusos corresponde a uma linha imaginária traçada, sobre a superfície, de um pólo ao outro. Desse modo, cada fuso se encontra entre dois meridianos. Toda porção terrestre que se estabelece nesse intervalo possui o mesmo horário. Antes da implantação dos fusos, havia diversos contratempos e problemas, por isso foi realizada em 1884, nos Estados Unidos, uma conferência de astrônomos na qual foi discutida a padronização dos horários em todos os pontos do planeta. O Meridiano de Greenwich é o meridiano principal, uma vez que esse é o ponto inicial ou referencial para a implantação dos fusos. A partir do Meridiano de Greenwich, no sentido leste, a cada fuso adianta-se uma hora, e no sentido oeste, atrasa-se uma hora.

2.3.14 Horário de verão

O horário de verão contribui para reduzir o consumo de energia, mas esta medida só funciona nas regiões distantes da linha do equador. Nesta estação os dias se tornam mais longos e as noites mais curtas. Contudo em países como o Brasil, em que na maior parte do seu território os dias e as noites têm aproximadamente a mesma duração, o horário de verão tem como objetivo principal a redução da demanda máxima do fornecimento de energia elétrica no período de pico. Isso é possível, pelo fato da parcela de carga referente à iluminação ser acionada mais tarde, que normalmente o seria motivada pelo adiantamento do horário brasileiro em 1 hora. O efeito provocado é de não haver a coincidência entre a demanda de iluminação e o consumo existente ao longo do dia do comércio e da indústria, que apresenta uma tendência de diminuição após as 18 horas.

2.3.15 Hora solar

A hora solar média é baseada no ângulo horário do centro médio do Sol. O Sol médio é um Sol fictício que se move ao longo do equador celeste, com velocidade constante, de modo que os dias solares médios são iguais entre si, ao passo que os dias solares verdadeiros não são iguais, pois o Sol não se movimenta na eclíptica com velocidade angular constante. Porém o ano solar é igualmente periódico, portanto o ano solar verdadeiro tem a mesma duração do ano solar médio. A hora solar média é baseada no dia solar médio que possui 24 horas, com 12 h sendo o horário em que o Sol está exatamente na direção norte. O conceito de hora solar é usado para prever a direção dos raios solares em um determinado ponto sobre a Terra. A hora solar depende da localidade (longitude) e geralmente é diferente

da hora local marcada pelos relógios, definida pelas Zonas de Hora Padrão (fusos horários) e outras aproximações. A expressão que permite calcular o ângulo horário a partir da hora solar é

$$\omega = 15(t_s - 12) \quad (2.6)$$

onde t_s é a hora solar (medida em horas, numa escala de 0 a 24) (Stine & Gayer, 2001; Alves, 2008).

2.3.16 Equação do tempo

A hora solar verdadeira e a hora solar média pode se diferenciar em até 17 minutos a depender do dia do ano. Essa diferença é descrita através da expressão conhecida como Equação do Tempo ou *EOT* (do inglês Equation Of the Time). A curva da Figura 2.10 representa graficamente a Equação 2.7 desenvolvida por Woolf (1968), e caracteriza essa variação.

$$EOT = 0,258 \cos(x) - 7,416 \sin(x) - 3,648 \cos(2x) - 9,228 \sin(2x) \text{ (min)} \quad (2.7)$$

com x sendo calculado através de

$$x = \frac{360(N-1)}{365,242} \text{ (graus)} \quad (2.8)$$

e N sendo o enésimo dia do ano no calendário Juliano. Essa equação possui uma incerteza de 30s. Lamm (1981) desenvolveu uma equação, Equação 2.9, do tempo com erro de apenas 0,63s. Ideal para aplicações em rastreadores solares que visam obter o máximo de rendimento possível durante a coleção da radiação solar posicionando sua superfície ativa perpendicular aos raios solares.

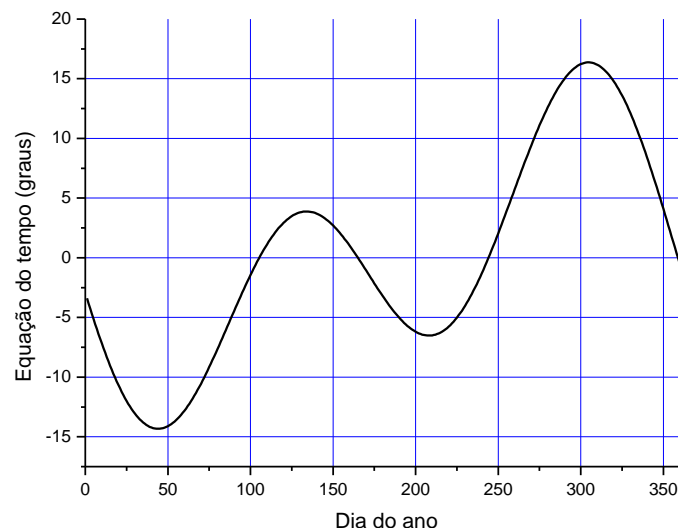


Figura 2.10 Curva da Equação do Tempo

$$EOT = 60 \sum_{k=5}^5 [A_k \cos \left(\frac{360kn}{365,25} \right) + B_k \sin \left(\frac{360kn}{365,25} \right)] \quad (\text{min}) \quad (2.9)$$

onde n representa os dias num ciclo de 4 anos sendo n=1 o primeiro dia de cada ano bissexto, e n=1.461 correspondente ao dia 31 de dezembro do último ano do ciclo e os coeficiente A_k e B_k são dados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Coeficientes da EOT - (Fonte: (Stine & Gayer, 2001))

K	A_k (hora)	B_k (hora)
0	$2,0870 \times 10^{-4}$	0
1	$9,2869 \times 10^{-3}$	$-1,2229 \times 10^{-1}$
2	$-5,2258 \times 10^{-2}$	$-1,5698 \times 10^{-1}$
3	$-1,3077 \times 10^{-3}$	$2,0870 \times 10^{-3}$
4	$-2,1867 \times 10^{-3}$	$2,0870 \times 10^{-3}$
5	$-1,5100 \times 10^{-4}$	$2,0870 \times 10^{-4}$

É possível então calcular a hora solar através da equação

$$t_s = LCT + \frac{EOT}{60} - LC - HV \quad (2.10)$$

onde LCT = Hora local, EOT = equação do tempo, HV = 1 se o local estiver em horário de verão e 0 se não estiver e LC calculado através de

$$LC = \frac{\text{longitude local} - \text{longitude do meridiano do fuso horário local}}{15} \quad (\text{horas}) \quad (2.11)$$

2.4 COLETORES DE RADIAÇÃO SOLAR

A humanidade está num ritmo acelerado de desenvolvimento tecnológico e por consequência, se tornando cada vez mais dependente do fornecimento de energia elétrica. Ainda assim cerca de 1,7 bilhões de pessoas, principalmente das zonas rurais, vivem sem o adequado acesso ao fornecimento de eletricidade (Rehman, Bader, & Al-Moallem, 2007). No Brasil estima-se que isso ocorra com cerca de 10 a 15% da população o que corresponde a 4 ou 5 milhões de domicílios (Poppe, 2002). Uma vez que o Sol despeja sobre a Terra uma imensa quantidade de energia a cada instante, faz-se mais que necessário estudar técnicas da sua coleta e aproveitamento bem com seu rendimento e vantagens quando comparado com outras formas de geração de energia elétrica.

Em seguida serão mostrados os mais comuns instrumentos e sistemas de coleta e transformação de energia solar bem com a física envolvida nos processos.

2.4.1 Células solares

2.4.1.1 O que são as células solares?

Em 1839 o físico francês Alexandre Edmond Becquerel (1820-1891) descobriu que certos materiais poderiam produzir pequenas quantidades de corrente elétrica quando expostos à luz. Este fenômeno é conhecido como efeito fotovoltaico. Anos mais tarde, em 1873, Willoughby Smith (1828-1891), engenheiro eletricitista inglês, demonstrou o fenômeno da fotocondutividade no selênio (Se). Pesquisas sobre o efeito fotovoltaico no selênio e em óxidos de cobre levaram ao desenvolvimento de células solares de selênio, que em 1914 já apresentavam eficiência de 1 a 2%.

Células solares também chamadas de células fotovoltaicas são dispositivos semicondutores de estado sólido que convertem a luz diretamente em eletricidade. Elas geralmente são feitas de silício, dopado com outros elementos, e podem ser considerados dispositivos da mesma família dos fotodiodos, diodos emissores de luz (LEDs), transistores, e circuitos integrados.

Embora o germânio (Ge) e o arseneto de gálio (GaAs) sejam também utilizados na fabricação de dispositivos semicondutores, o silício é ainda o material mais comum. As propriedades físicas do silício o tornam adequado para a fabricação de dispositivos ativos e com boas características elétricas. Além disto, o silício pode ser facilmente oxidado para formar excelentes camadas de isolamento. Este isolante é usado para fazer capacitores, dispositivos controlados por efeito de campo (FET) e podendo também atuar como máscara contra impurezas que poderiam difundir-se no silício de alta pureza. Estas características do silício o tornam adequado a fabricação de circuitos integrados, em que os componentes ativos e passivos são micro-fabricados juntos, sobre um mesmo substrato, e ao mesmo tempo sendo interconectados para formar o circuito completo.

Um dispositivo fotovoltaico é constituído por camadas de materiais semicondutores com diferentes propriedades eletrônicas. Numa típica célula solar de silício cristalino, a maior parte do material é o silício, dopado com uma pequena quantidade de boro para dar-lhe um caráter positivo ou tipo-p. Uma fina camada na parte da frente da célula é dopada com fósforo para dar-lhe um caráter negativo ou tipo-n. Na interface entre estas duas camadas aparece um campo elétrico em função da dopagem das camadas e é chamada de

junção. Nesta região as cargas [n (elétrons) e p (buracos)], criadas pela dopagem do silício cristalino, difundem e se combinam, criando uma zona desprovida de cargas livres e com natureza elétrica neutra.

A luz é composta de partículas chamadas fótons com quantidade de energia bem definida e que está relacionada com seu comprimento de onda. Quando a luz atinge a célula solar, alguns dos fótons são absorvidos no silício. Se os fótons tiverem energia suficiente eles serão capazes de elevar os elétrons a categoria de elétrons livres. Os elétrons livres são aqueles que, tendo absorvido um determinado quantum de energia, conseguirão se libertar da eletrosfera em que estava contido e então se deslocarão livremente pela rede cristalina. O campo elétrico na junção acelera estes portadores livres impedindo a recombinação e fazendo com que se movam na rede do silício, até chegar aos eletrodos da célula, para em seguida circularem pelo circuito externo. A corrente elétrica assim gerada pode ser convertida em trabalho útil movimentando motores, carregando baterias, acendendo lâmpadas, etc.

O processo fotovoltaico se dá completamente em estado sólido, ou seja, não existem peças móveis e materiais não são consumidos nem emitidos. Durante um típico dia ensolarado, um conjunto de células solares de um metro quadrado exposto ao sol ao meio-dia poderá converter a radiação incidente em muitos quilowatts (kW) de potência. Há uma série de tecnologias de células solares com diferentes taxas de conversão ou eficiência, que é razão entre a energia solar radiante e a energia elétrica convertida.

2.4.1.2 Características dos tipos de células solares mais comuns

Células solares podem ser fabricadas com diferentes tipos de materiais. Os mais utilizados são o silício (Si), o arseneto de gálio (GaAs), o disseleneto de cobre e índio (CuInSe₂) e telureto de cádmio (CdTe), todos materiais semicondutores. Sua estrutura cristalográfica, em função da característica de distribuição dos átomos no material e do seu grau de uniformidade, pode ser monocristalina, policristalina ou amorfa e depende do seu processo fabricação.

Uma segunda geração de células solares está baseada na tecnologia de filmes finos, camadas muito finas de materiais semicondutores dos quais o silício amorfo é o mais conhecido. Dispositivos de filmes finos, além de requererem pouca quantidade de material para fabricação, têm a vantagem de ser facilmente depositados em grandes áreas.

Células de silício monocristalino são fabricadas a partir do cristal de silício (Si). Estas células são as mais eficientes entre todas as células de silício e também são as que possuem

maior valor agregado. O monocristal é crescido a partir do silício fundido de alta pureza ($\text{Si} = 99,99\%$ a $99,9999\%$) em reatores sob atmosfera controlada e com velocidades de crescimento do cristal extremamente lentas, sendo este processo conhecido como método Czochralski ou CZ. Esse método, que é o mais usado na produção de silício (Ferrazza, 2003), consiste em tomar uma semente de silício monocristalino e colocá-lo em contato com a superfície superior de silício derretido. Como a semente é levantada lentamente, os átomos de silício fundido solidificarão seguindo o padrão ditado pelos átomos da semente, formando uma estrutura de cristal único. Esta técnica é a base da indústria de micro-eletrônica. O produto final é uma lâmina ou disco de silício monocristalino fino, também conhecido como *waffer*, Figura 2.11. Existem também outras etapas para a produção da célula: usinagem do tarugo mostrado na Figura 2.12, corte dos discos (*wafers*) por serras diamantadas, lapidação, ataque químico e polimento, onde ocorrem consideráveis perdas de material, processos de difusão/dopagem, deposição da máscara de contatos e, finalmente, a interconexão de células em série e em paralelo para a obtenção do painel fotovoltaico (Falcão, 2005). Células de silício, Figura 2.12, monocristalino tem sua eficiência entre 13 a 16% (BP Solar, 2009).

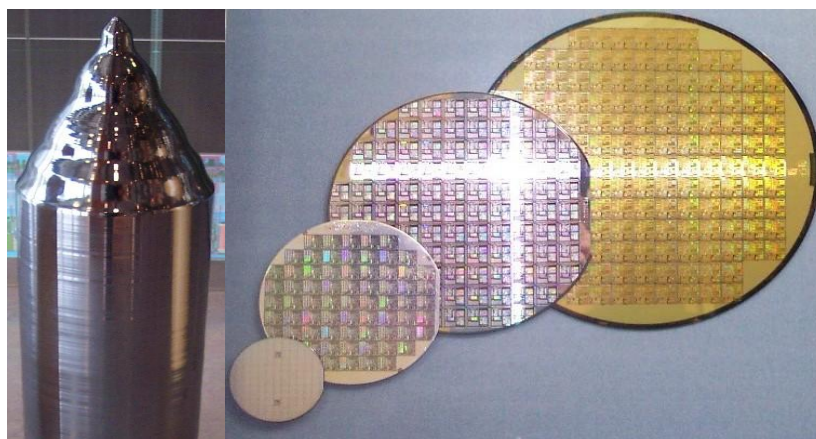


Figura 2.11 A esquerda um tarugo de silício monocristalino após CZ e a direita *waffers* de silício – (Fonte: www.wikipedia.org)

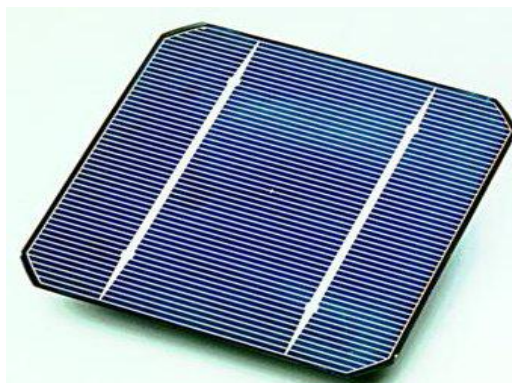


Figura 2.12 Célula solar de silício monocristalino – (Fonte : www.wikipedia.org)

O GaAs é um material com várias propriedades desejáveis à aplicação em células solares tais como energia de banda proibida próxima ao valor ideal, 1,1 a 3,1 eV correspondentes a faixa de comprimento de onda solar incidente que é de 390 a 1100 nm, alto coeficiente de absorção, além de poder formar ligas com vários materiais. Embora as células solares de GaAs apresentem elevada eficiência, chegando a 18,5% (Ferriani, et al., 2006), elas não são competitivas em termos de aplicações terrestres devido aos altos custos envolvidos em seu processo de fabricação.

Células de silício policristalino não possuem a mesma perfeição cristalina quando comparada com o silício monocristalino, por isso são menos eficientes e também mais baratas uma vez que processo de fabricação é mais simples. Elas consistem de pastilhas de silício policristalino tratadas quimicamente. A espessura dos *wafers* comerciais está entre 200 e 400 μm , sendo cobertas por uma grade metálica em ambas as faces para formar o contato elétrico. O material de partida é o mesmo que para o silício monocristalino, o qual é fundido e posteriormente solidificado direcionalmente, o que resulta num cristal com grande quantidade de grãos, no contorno dos quais se concentram os defeitos que tornam este material menos eficiente do que o silício monocristalino em termos de conversão fotovoltaica. O silício policristalino, cuja fotografia da célula é mostrada na Figura 2.13, é a tecnologia fotovoltaica mais tradicional, mas o fato de fazer uso de pastilhas representa uma maior limitação em termos de redução de custos de produção, tendo em vista a quantidade de material utilizado na fabricação das células. Eficiências entre 12 e 15% (BP Solar, 2009) (Ferrazza, 2003) (Falcão, 2005).

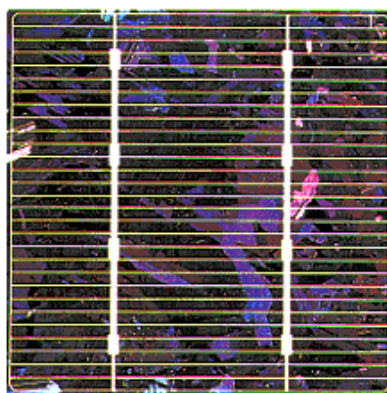


Figura 2.13 Célula solar de silício policristalino – (Fonte : <http://www.domus-solaris.com>)

Células de silício amorfo (aSi) são as que apresentam o custo mais reduzido, mas em contrapartida o seu rendimento elétrico é também o menor, aproximadamente 8% a 10%, ou 13% em laboratório (BP Solar, 2009). As células de silício amorfo, mostrada na Figura 2.14, são películas muito finas, o que permite serem depositados sobre substratos de baixo custo, como vidro, aço inox e alguns plásticos. Estas células apesar de serem menos eficientes que as células de silício policristalino, no entanto, poderão vir a ser competitivas para produção em grande escala. O custo de material e energia envolvidos na produção de filmes finos amorfos é muito menor do que para materiais cristalinos comparáveis quanto a área de utilidade, porque o processamento envolvido na produção e *waffers* monocristalinos, além de lento, exige altas temperaturas e é desnecessário no caso de filmes amorfos. Por sua aparência estética mais atraente, o silício amorfo tem encontrado aplicações arquitetônicas diversas, substituindo materiais de cobertura de telhados e fachadas na construção civil.



Figura 2.14 Célula solar de silício amorfo – (Fonte : www.domus-solaris.com)

O mais recente competidor do silício amorfo e do silício policristalino no mercado fotovoltaico para geração de energia é o telureto de Cádmio (CdTe), também na forma de filmes finos. Para aplicações em calculadoras, o CdTe já vem sendo usado há quase uma década, mas nas, assim chamadas, aplicações terrestres, a pouco tempo é que começaram a ser comercializados painéis solares de grandes áreas. Estes painéis, normalmente sob a forma de placas de vidro num tom marrom ou azul escuro, também apresentam um atrativo estético em comparação ao silício policristalino. Assim como no caso do silício amorfo, os custos de produção do CdTe são atrativamente baixos para produção em grande escala e esta tecnologia tem ótimas chances de despontar como um sério competidor no mercado fotovoltaico para a geração de energia elétrica. A relativamente baixa abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade são aspectos que têm de ser levados em conta, principalmente se esta tecnologia atingir quantidades significativas de produção (Falcão, 2005) (Bonnet, 2003). Sua eficiência está entre 8 e 10% (BP Solar, 2009).

Célula de CIS é uma célula fotovoltaica baseada no composto disseleneto de cobre e índio, CuInSe_2 , ou CIS com também é chamado. Vem ganhando espaço no mercado fotovoltaico principalmente por seu potencial de atingir eficiências relativamente elevadas. Painéis solares feitos de CIS apresentam também boa aparência estética e devem surgir no mercado com grandes superfícies, encontrando aplicações arquitetônicas diversas. Os elementos que o constituem são pouco abundantes na natureza e sua toxicidade são aspectos que têm de ser considerados se esta tecnologia atingir quantidades significativas de produção.

Atualmente, a liga $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ surge como uma alternativa ao CIS. Estas ligas, conhecidas como CIGS, mostram-se também promissoras para fabricação em grande escala. Elas são estáveis e resistentes não só quando expostas à radiação solar terrestre como também às condições de radiação no espaço. Eficiência maior que 13% (Rau & Schock, 2003).

2.4.1.3 Como funciona a conversão fotovoltaica?

As células fotovoltaicas são constituídas por uma pastilha de semiconductor duplamente dopada (p e n). A dopagem é feita adicionando a uma das superfícies, átomos mais eletronegativos que o semiconductor intrínseco, criando assim uma camada do tipo n. À outra superfície são adicionados átomos menos eletronegativos que o semiconductor predominante, dando origem então a uma camada do tipo p. Quando esse processo químico termina, os dois tipos de portadores se combinam formando uma junção pn, cujo diagrama é mostrado na Figura 2.15, formando a chamada de zona de depleção onde aparece um campo elétrico da parte dopada n para a parte da pastilha dopada p. Contatos elétricos metálicos são depositados nas extremidades em ambos os lados da pastilha. A porção dopada negativamente tem que ser fina, de forma a permitir a passagem da luz. Deste modo, os fótons que atravessam a camada n, chegam a zona de depleção em torno da junção pn, se estes têm energia ($h\nu$) igual ou superior a requerida para vencer a energia de gap do material, estes bósons criam pares elétrons buracos livres. Os elétrons são empurrados para o lado n e os buracos (falta de elétrons) são levados a lado p da pastilha, o que gera corrente elétrica. Quanto maior a quantidade de fótons com energia capaz de fazer as cargas vencerem a energia de gap do material, maior será intensidade da energia elétrica convertida. No caso do silício esta energia mínima corresponde ao valor do infravermelho próximo, 1100 nm. Os comprimentos de onda maiores terão por efeito o aquecimento da célula, sem gerar corrente. Por isso nem todo o espectro solar é útil para obter a energia elétrica em uma célula fotovoltaica de silício, ver Figura 2.16.

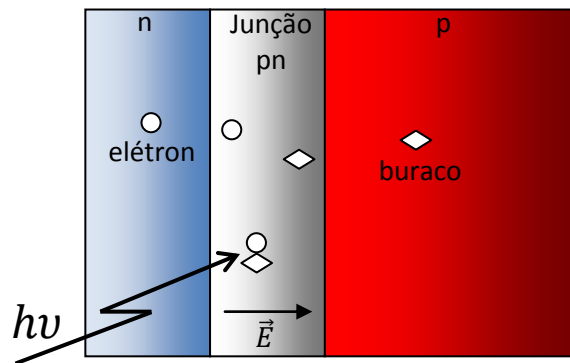


Figura 2.15 Diagrama de uma junção PN

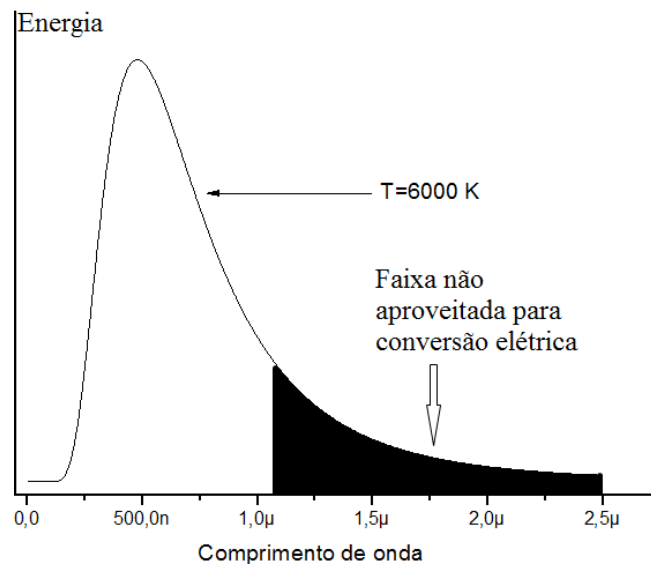


Figura 2.16 Porção do espectro solar não aproveitada para conversão elétrica

2.4.2 O sistema fotovoltaico

Um sistema fotovoltaico é composto por um conjunto de módulos fotovoltaicos e um conjunto de equipamentos complementares que inclui: baterias, controladores de carga, circuitos de segurança, inversores, entre outros. Estes componentes variam de acordo com a aplicação do sistema fotovoltaico em questão.

2.4.2.1 Inversores de corrente

Os módulos fotovoltaicos geram eletricidade na forma de uma corrente contínua e podem fornecer energia para carregar baterias e assim acender lâmpadas, acionar motores, equipamentos de comunicação e controle, aquecedores, fornos e outros diversos tipos aparelhos elétricos. Porém muitos aparelhos e equipamento necessitam de alimentação em corrente alternada. É possível, contudo, converter a corrente contínua (CC) fornecida pela baterias integradas aos sistemas solar em corrente alternada (CA) utilizando inversores de corrente. O inversor é um equipamento usado na conversão da corrente contínua, gerada pelos painéis fotovoltaicos, ou fornecida por baterias, em corrente alternada, permitindo que equipamentos tais como refrigeradores, bombas, etc., que geralmente funcionam em corrente alternada, possam ser conectados ao sistema solar.

2.4.2.2 Acumuladores (Banco de baterias)

O painel solar converte diretamente a energia radiante do Sol e assim é possível acender uma lâmpada ou acionar um motor para bombeamento de água, por exemplo, sem a utilização do acumulador de energia (banco de baterias). Entretanto, os sistemas de energização residencial, ou em agroindústria, por exemplo, necessitam das baterias para acumular a energia produzida durante o dia, que assim poderá ser utilizada mesmo durante a noite. O uso da energia solar praticamente não é interrompido, evitando-se assim que variação de insolação afete o desempenho dos equipamentos em uso.

Existem modelos de baterias especiais para aplicação em energia solar. É recomendável a utilização de baterias que permitem a descarga profunda. Baterias automotivas, por exemplo, mesmo as seladas, não podem ser descarregadas abaixo de um determinado limite (tensão da bateria em circuito aberto < 10.5 Vdc), o que leva a perda da sua capacidade de recarregar.

2.4.2.3 Controladores de carga

Os controladores de carga funcionam protegendo os equipamentos de sobretensão e protegendo as baterias com controle da carga e descarga. Assim a carga é mais segura e rápida para o acumulador. Uma vez carregado, o controlador supervisiona o estado do acumulador ao longo do tempo. A descarga é protegida contra curtos circuitos impedindo que o acumulador ultrapasse o nível mínimo de tensão, ou máximo de corrente. Além disso, seu circuito impede a inversão de polaridade e falhas que possam ocorrer no sistema, protegendo painel solar, acumuladores e equipamentos conectados ao sistema solar.

2.4.2.4 Sistemas autônomos, híbridos e interligados a rede

Os sistemas autônomos de energia fotovoltaica produzem eletricidade independentemente de outras fontes de energia. No Brasil este tipo de aplicação é mais comumente usado em sistema de bombeamento de água na zona rural e sistemas de telecomunicações (Fraidenraich, 2002).

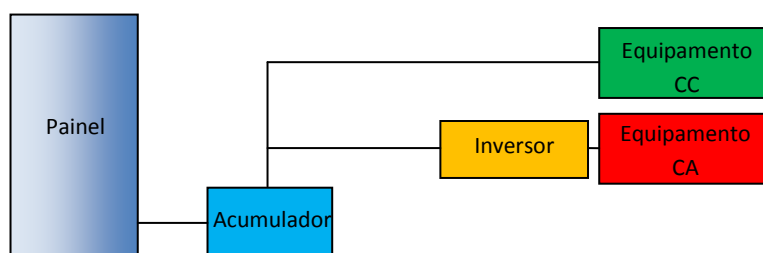


Figura 2.17 Diagrama de um sistema autônomo

Os sistemas híbridos são sistemas fotovoltaicos que operam em conjunto com outras fontes geradoras de energia como geradores eólicos, motores a diesel, etc. Neste caso, o sistema faz parte de uma matriz energética, complementando ou sendo complementado por outra fonte de energia. Os painéis fotovoltaicos e as baterias neste caso requerem menor dimensionamento, fazendo com que o custo da aplicação seja reduzido.

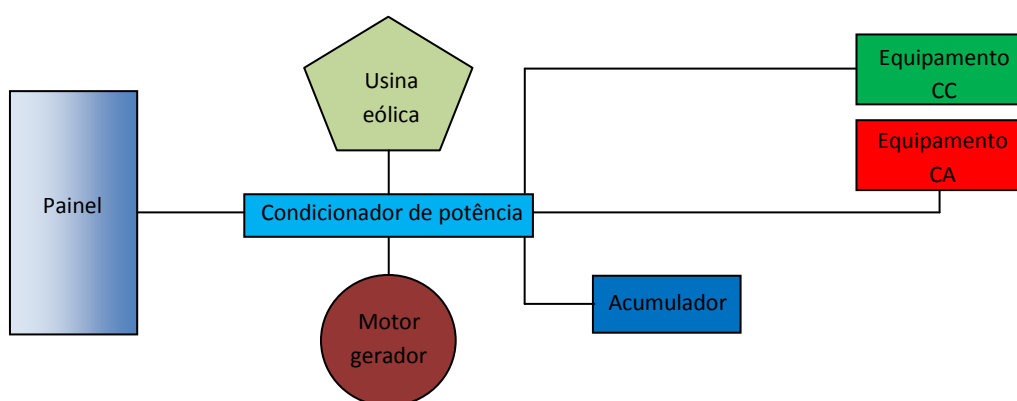


Figura 2.18 Diagrama de um sistema híbrido

Os sistemas interligados em rede são aqueles em que o arranjo de módulos fotovoltaicos atua como uma fonte de energia complementar a rede de distribuição de energia elétrica a qual está conectada. Esse sistema não utiliza acumuladores, pois, toda a energia gerada passa por inversores de corrente e é direcionada a rede.

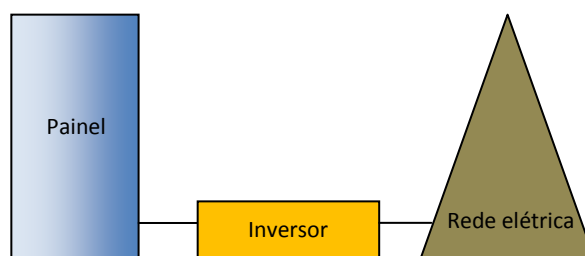


Figura 2.19 Diagrama de um sistema interligado a rede

Quando o sistema é integrado à edificação, além de gerar energia elétrica, os painéis podem substituir portas, janelas, telhas, elementos de sombreamento, etc., gerando soluções arquitetônicas estéticas e economicamente viáveis.

2.4.2.5 O módulo fotovoltaico

A célula solar é o dispositivo mais importante do sistema fotovoltaico, visto que é responsável pela conversão da energia solar em corrente elétrica. Esta corrente depende da intensidade da radiação solar e da área iluminada. Contudo uma célula sozinha tem pouca aplicação, pois gera uma tensão muito pequena, tomando com exemplo a célula de silício que tem sua tensão de trabalho da ordem de 0,6 V. Para uma utilização prática é necessário conectar várias células em série criando assim o módulo fotovoltaico. Um módulo com 25 células fotovoltaicas com tensão de trabalho igual a 0,6 V ligadas em série é capaz gerar uma tensão da ordem de 15 volts, que poderá, por exemplo, carregar um banco de baterias de 12 V. Para proteger as células solares, os módulos são encapsulados com materiais plásticos. O lado onde a radiação incide é coberto com vidro temperado e a parte posterior com encapsulamento plástico de E.V.A. (*ethylene vinyl acetate*, ou em português, etileno acetato de vinila) (Du Pont, 2010). Finalmente, o módulo é emoldurado com uma estrutura de alumínio anodizado (tratamento que se dá ao alumínio para diminuir o processo de oxidação), que lhe dá rigidez. A ligação dos módulos pode ser em série conectando-se o terminal positivo de um módulo a um terminal negativo de outro, aumentando-se assim o valor da tensão fornecida, ou em paralelo ligando-se terminais de mesma polaridade o que aumentando assim o fornecimento de corrente.

2.4.2.6 Características elétricas dos módulos fotovoltaicos

Como foi visto o módulo fotovoltaico gera energia elétrica em corrente contínua quando exposto ao Sol, mas sua intensidade não depende apenas da intensidade da

radiação solar, mas também da temperatura do módulo. Existem diversos parâmetros que caracterizam um painel fotovoltaico.

Potência de pico (Wp) é a potência gerada pelo painel numa situação em que ele esteja sendo exposto a uma insolação de 1000 W/m^2 quando a temperatura do módulo é 25°C .

A potência elétrica (P) é o produto da tensão (V) pela corrente (I) geradas. É possível então ligar uma carga resistiva aos terminais do painel, variar sua resistência e tomando diversos pontos traçar a curva característica do módulo ($I \times V$), como mostra a Figura 2.20. O ponto em que a corrente é máxima e a tensão é nula, chama-se corrente de curto circuito (I_{cc} ou I_{sc} do inglês *short circuit*). Já no ponto em que a corrente é nula e V máxima é conhecida como tensão de circuito aberto (V_{ca} ou V_{oc} do inglês *opened circuit*). Nesses dois pontos a potência gerada é nula.

O aumento da radiação solar incidente no painel aumenta a corrente gerada, mas aumenta também sua temperatura e isso influencia o rendimento do painel, pois o valor da tensão diminui com o aumento da temperatura enquanto que a corrente sofre pequena variação, essas influências são ilustradas na Figura 2.21.

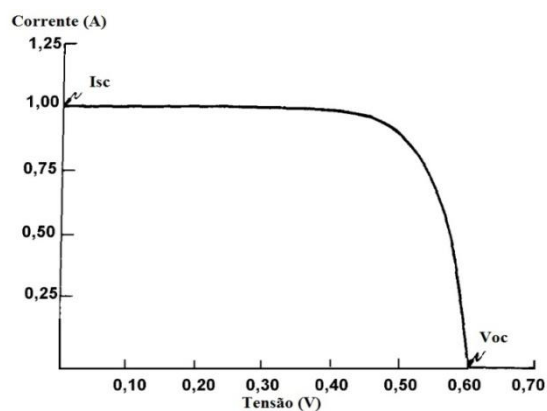


Figura 2.20 Curva característica de uma célula - (Fonte: Cresesb)

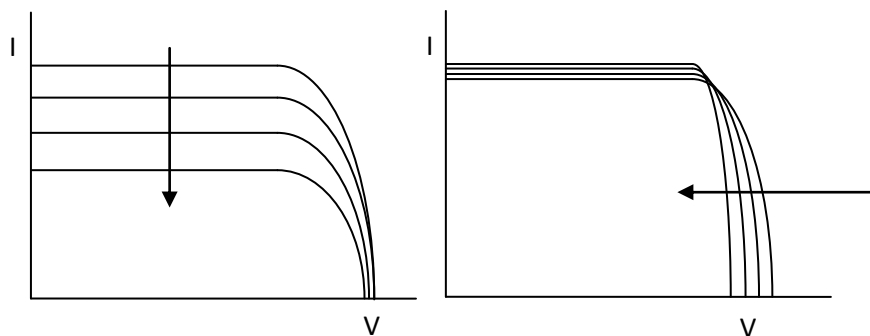


Figura 2.21 À esquerda: influência da diminuição da insolação;
À direita: influência do aumento da temperatura

Existe apenas um ponto da curva onde a potência é máxima. Conseqüentemente existe somente uma tensão e uma corrente para a qual a potência máxima (P_{max}) é gerada. Traçando a curva potência em função da tensão encontra-se o ponto de maior potência em função de um valor de tensão chamado tensão de máxima potência (V_{mp}). O valor da corrente, na curva característica, correspondente a tensão de máxima potência chama-se corrente de máxima potência (I_{mp}). Esses são os parâmetros utilizados pelos fabricantes de módulos solares: potência máxima ($P_{m\acute{a}x}$), tensão e corrente de máxima potência (V_{mp} , I_{mp}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto circuito (I_{sc}) e eficiência. A eficiência (η) indica quanto da energia solar incidente no painel é transformada em energia elétrica e pode ser calculada por

$$\eta = \frac{P_{max}}{I \times A} \quad (2.12)$$

onde I é o valor da irradiação sobre a área ativa do painel e A o valor da área ativa do painel (Cresesb).

2.4.3 Rastreamento solar

Apesar da imensa quantidade de energia em forma de radiação solar ser despejada sobre a Terra todos os dias, o seu aproveitamento por painéis fotovoltaicos ainda é muito pequeno devido a baixa eficiência dos módulos solares. A cada dia avançam as pesquisas na tentativa de aumentar a eficiência dos módulos fotovoltaicos. Além disso, como o Sol possui uma dinâmica bastante evidente na eclíptica e a direção de incidência dos raios solares influencia bastante na captação de energia radiante, sistemas conhecidos como rastreadores solares, que aumentam sensivelmente a quantidade de energia captada pelos painéis solares, estão cada vez mais sendo utilizados.

Os sistemas rastreadores são plataformas de sustentação que orientam conjuntos de módulos fotovoltaicos, movimentando-os de maneira a buscar a melhor incidência de raios solares desde o amanhecer até o ocaso, aumentando assim a eficiência na conversão de energia solar radiante em energia elétrica.

Os rastreadores solares podem ser classificados de acordo com seu sistema de controle, ou seja, modo passivo ou ativo e podem ser construídos com apenas um eixo de rotação, eixo único (single-axi), ou com dois eixos (two-axes).

Os rastreadores de eixo único realizam um movimento que acompanham a variação do ângulo horário solar durante o dia e retornam para sua posição inicial no final do dia ou início da manhã a fim de recomençar o procedimento novamente. Já os rastreadores de dois eixos realizam automaticamente a movimentação dos eixos de forma conjugada também com o intuito de acompanhar Sol na eclíptica. Esse sistema é capaz de corrigir a orientação dos módulos solares a fim de acompanhar não só o ângulo horário, mas também o ângulo de declinação solar. Comparado com a captação de módulos fixos, orientados em uma inclinação ótima, os módulos solares acoplados aos seguidores solares, como também são chamados, de eixo único, promovem um aumento superior a 20% na geração de energia. Já os seguidores de dois eixos podem aumentar a produção em valores superiores a 40% ao longo do ano. Existem seguidores de dois eixos utilizados em concentradores solar que utilizam lentes de Fresnel para centrar os raios solares em uma célula solar. Este tipo de aplicação exige alto nível de exatidão por parte do seguidor.

De um lado, os seguidores de eixo único, embora menos exato que o de dois eixos, tem alto potencial de aplicação em explorações agrícolas, pois aumentam a produção de energia do início da manhã e no fim da tarde. Comparado ao custo total dos sistemas fotovoltaico, os seguidores solares são dispositivos relativamente baratos, mas que aumentam significativamente a eficiência na geração de energia dos módulos fotovoltaicos, mesmo que alguns sistemas necessitem de ajustes de posição durante o ano, inspeção e lubrificação periódica (Gevorkian, 2008).

Um coletor solar recebe em sua área ativa (A) o máximo possível de radiação solar quando os raios incidentes (E_z) incidem sobre ele na perpendicular, ou formando ângulo nulo com a normal a superfície coletora desses módulos solares. Quanto maior for o ângulo de incidência, com relação a normal a superfície, maior será a área irradiada e menor então a densidade de energia absorvida por unidade de área. Isso é conhecido como lei de Lambert ou simplesmente efeito cosseno e é ilustrado na Figura 2.22.

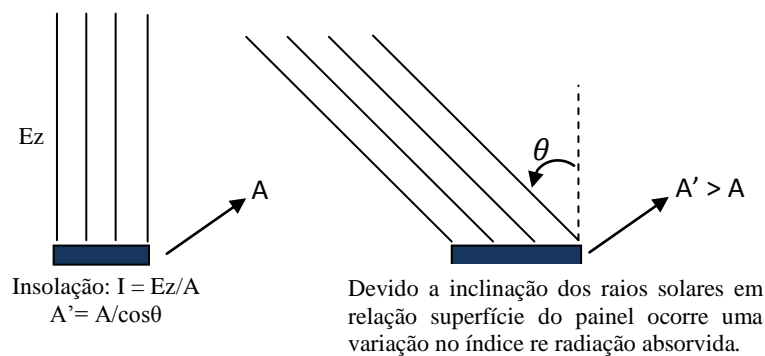


Figura 2.22 Diagrama sobre a influência da inclinação da radiação incidente sobre o painel. Efeito cosseno.

2.4.3.1 Painéis fixos

Os sistemas com painéis fixos necessitam de uma orientação inicial. A configuração mais utilizada para painéis fixos é direcioná-los para o equador com uma inclinação igual à latitude em que está posicionado o painel.

2.4.3.2 Rastreadores passivos

Existem diversos tipos de rastreadores solar que utilizam sensores externos para avaliar a posição do Sol e fazer com que o mecanismo movimente os módulos para melhor captação da radiação. Esses rastreadores são classificados como rastreadores passivos. Neste caso as várias condições climáticas tais como flutuações da temperatura, ventanias, nuvens, entre outras, afetam sensivelmente o seu desempenho, por isso são considerados com eficiência de seguimento incerta, entretanto, fornecem melhor capacidade de desempenho solar que os de sustentação fixa.

O sistema descrito por Poulek e Libra (1998), Figura 2.23, é um típico rastreador passivo utilizando apenas um motor para movimentação do painel principal e um painel com 2% das dimensões do primeiro que gera a energia necessária para alimentar o motor e movimentá-lo no sentido leste-oeste durante o dia e de oeste para leste no início da manhã, a fim de recomençar a movimentação de um ponto inicial definido.

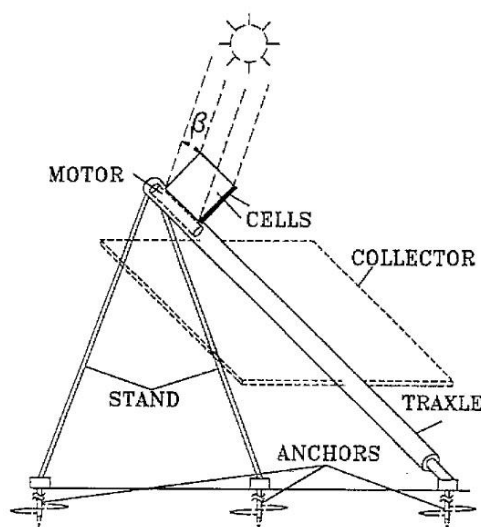


Figura 2.23 Exemplo de rastreador passivo - (Fonte: Poulek & Libra (1998))

Alguns sistemas utilizam LDR (do inglês, *Light Dependent Resistor*, resistor dependente da luz) ou fotodiodos como sensores para avaliarem no céu de onde vem a maior incidência de energia radiante e através de um circuito diferencial comandar os motores para sua movimentação. Isso ocorre, por exemplo, no aparato inventado por Hammons (1980), mostrado na Figura 2.24.

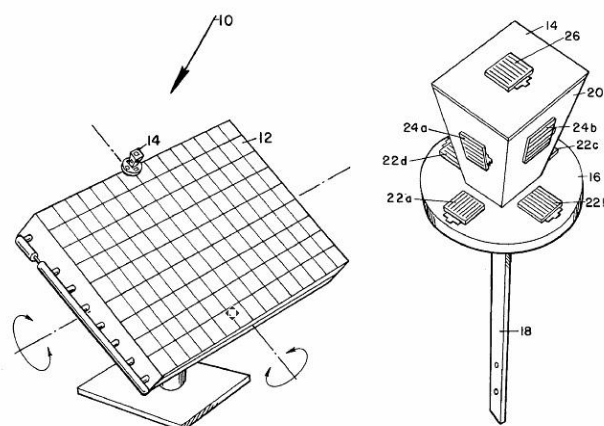


Figura 2.24 Exemplo de rastreador passivo utilizando LDR como sensores de avaliação da direção da maior insolação - (Fonte: Hammons (1980))

A Figura 2.25 mostra um rastreador passivo baseado no uso de gás comprimido de baixo ponto de ebulição que são movidos devido ao sombreamento do compartimento que o contém. Na sombra o gás se liquefaz e se desloca inclinando o painel, a medida que o Sol se movimenta de leste para oeste.

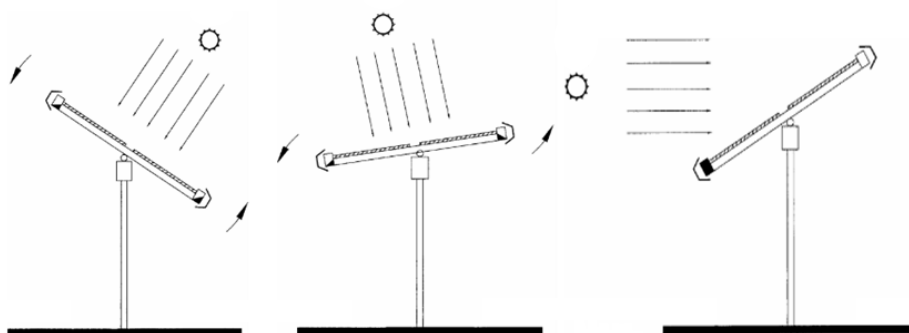


Figura 2.25 Exemplo de rastreador passivo utilizando processo de convecção de uma gás para movimentar o painel

2.4.3.3 Rastreadores de eixo polar

Rastreadores polares possuem um eixo de rotação no mesmo padrão que a Terra, daí o nome. Esses rastreadores geralmente são alinhados perpendicularmente à eclíptica e são ajustados manualmente para compensar as mudanças sazonais da eclíptica que ocorrem com as estações do ano. Rastreadores polares são geralmente usados em montagens de telescópios astronômicos.

2.4.3.4 Rastreadores de eixo horizontal

O rastreador horizontal, como mostra a Figura 2.26, possui apenas um eixo horizontal que pode ser acionado por mecanismos passivos ou ativos. Trata-se de um longo eixo tubular suportado por mancais. O eixo é instalado em uma orientação norte-sul, enquanto que os painéis fotovoltaicos montados sobre o eixo tubular gira no sentido leste-oeste acompanhando o movimento aparente do Sol durante todo o dia. Esse tipo de rastreador não faz a correção durante a movimentação anual do Sol. Como resultado, sua eficiência de produção de energia é significativamente reduzida durante o verão e inverno, no entanto, sua produtividade aumenta substancialmente na primavera e no outono quando o ângulo de declinação é nulo. Devido a simplicidade de seu mecanismo os rastreadores horizontais podem equipar diversas aplicações.

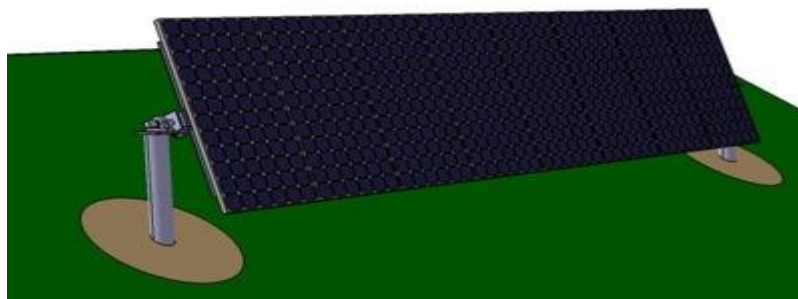


Figura 2.26 Rastreador de eixo horizontal -
(Fonte: www.easy-engineering.ch)

2.4.3.5 Rastreadores de eixo vertical

Rastreadores de eixo vertical são sistemas onde o painel solar se movimenta montado sobre um eixo paralelo ao zênite local. Estes tipos de rastreadores têm uma utilização limitada e geralmente são implantados em latitudes elevadas, onde o ângulo de declinação é grande. Painéis fotovoltaicos montados sobre um sistema de eixo vertical são adequados para operação durante longos dias de verão nos territórios do norte, onde os dias solares são extensos no verão.

2.4.3.6 Rastreadores ativos

Os rastreadores ativos utilizam microprocessadores, controladores lógicos programáveis (CLP), computadores, etc., que fazem uma combinação de algoritmos e rotinas de cálculos, a partir de conhecimentos astronômicos, de forma a prever a localização exata do Sol em relação à Terra a cada instante. Tais sistemas, também são capazes de atuar de forma precisa sobre a dinâmica de atuadores pneumáticos, hidráulicos e eletromecânicos que movimentam o painel.

Sungur (2009) na Turquia em latitude $37,6^\circ$, Abdallah e Nijmed (2004) na Jordânia a 32° de latitude e Alves (2008) em Bauru-SP localizado a 22° investigaram painéis ativos controlados por CLP e verificaram ganhos acima de 40% comparados a painéis fixos em posição ótima.

2.4.4 Atuadores eletromecânicos (Motores elétricos)

Nos atuadores eletromecânicos que compõem os sistemas de rastreamento solar ativo geralmente são usados motores elétricos.

Motores elétricos são atuadores que transformam energia elétrica em mecânica de forma a promover a movimentação de cargas e estruturas. Acoplados a eles podem estar eixos, engrenagens, polias e correntes, além de outros elementos de máquina dimensionados para realizar a movimentação com a velocidade e exatidão necessárias para orientar, por exemplo, painéis solares.

Conforme a natureza da corrente que os alimenta, os motores elétricos podem ser classificados em motores de corrente contínua (CC), que são descritos a seguir, e motores de corrente alternada (CA).

2.4.4.1 Aspectos construtivos

O motor de corrente contínua é composto de duas estruturas magnéticas, o estator e o rotor.

O estator é composto de uma estrutura ferromagnética com pólos salientes aos quais são enroladas as bobinas que formam o campo, ou de um ímã permanente.

O rotor é um eletroímã constituído de um núcleo de ferro com enrolamentos em sua superfície que são alimentados por um sistema mecânico de comutação. Esse sistema é formado por um comutador, solidário ao eixo do rotor, que possui uma superfície cilíndrica com diversas lâminas às quais são conectados os enrolamentos do rotor e por escovas fixas que exercem pressão sobre o comutador e que são ligadas aos terminais de alimentação. O propósito do comutador é inverter a corrente na fase de rotação apropriada, de forma a que o conjugado desenvolvido seja sempre na mesma direção. Os enrolamentos do rotor compreendem bobinas de n espiras. Os dois lados de cada enrolamento são inseridos em sulcos com espaçamento igual ao da distância entre dois pólos do estator. Desse modo, quando os condutores de um lado estão sob a influência do pólo norte, os condutores do outro devem estar sob a influência do pólo sul. As bobinas são conectadas em série através das lâminas do comutador, com o fim da última bobina conectado ao início da primeira, assim o enrolamento não tem um início ou um final específico.

Diferentes modelos de motor elétrico possuem praticamente os mesmos elementos principais, porém com diferenças construtivas importantes entre elas. Em alguns modelos a bobina de armadura está no estator e não no rotor. O mesmo acontece com a bobina de campo. Outros não possuem escovas e comutadores, outros possuem bobinas de armadura, etc.

O princípio de funcionamento de um motor é o movimento de rotação do rotor. Um torque é produzido por forças magnéticas de atração e repulsão desenvolvidas entre os pólos magnéticos do rotor e do estator a cada instante. Os campos magnéticos que aparecem nos enrolamentos são produzidos pelo fluxo de corrente elétrica no condutor que os compõem. O torque desenvolvido promove então o giro do rotor.

Os motores CC são usados em aplicações onde se pretende variar a velocidade durante o funcionamento ou quando o conjugado (torque) resistente de partida da máquina acionada é elevado. A variação de velocidade desses motores é conseguida de diversos modos, sendo que os mais comuns são a variação da tensão e a variação do fluxo no entreferro pela redução da corrente. A modificação no valor de tensão pode ser feita variando a resistência disposta em série, com o emprego de um

reostato, isto é, resistor ou conjunto unitário de resistores interligados, cuja resistência de saída pode ser variada de maneira contínua ou por degraus.

Os motores de corrente contínua, conforme sua modalidade construtiva são classificados em motor paralelo (*shunt*), motor série ou motor composto (*compound*). A Tabela 3 mostra as características dos motores *shunt*, *compound* e série.

Motores *shunt* são empregados quando as características de partida (torque, tempo e aceleração) não são muito severas. O conjugado é proporcional a corrente aplicada e a velocidade de operação permanece aproximadamente constante. São usados nos acionamentos de turbo-bombas, ventiladores, esteiras transportadoras, etc.

Nos motores série a velocidade varia com a carga e o conjugado de partida é muito grande. Por isso são muito empregados em tração elétrica, guindastes, pontes rolantes, compressores etc. Não devem funcionar em vazio, ou seja, sem carga resistente.

Os motores *compound* reúnem as características dos dois tipos anteriores, portanto corrente de partida elevada e velocidade aproximadamente constante. Usadas em calandra, bombas, etc. (Niskier & Macintyre, 2000).

A corrente fornecida pela rede elétrica é alternada, portanto para que os motores sejam alimentados pela rede elétrica, entre a rede e os motores deve haver um circuito para a retificação da corrente.

Tabela 3 – Característica do motor tipo *shunt*, *compound* e série

Motor <i>shunt</i>	Velocidade aproximadamente constante desde a carga zero até a plena carga
Motor <i>compound</i>	Velocidade semi-constante da carga zero até a plena carga
Motor série	Velocidade variável, decrescente com o aumento da carga

2.4.4.2 Potência do motor CC

Potência nominal ou potência de saída (P_n). É a potência mecânica no eixo do motor. Essa medida pode feita usando-se em laboratório um freio dinamométrico. Potência de entrada (P_e) corresponde a potência absorvida pelo motor para o seu desempenho que pode ser calculada pelo produto entre a corrente de entrada e a tensão de entrada. A razão entre a potência nominal e a potência de saída é o rendimento mecânico (η) do motor, dado por

$$\eta = \frac{P_n}{P_e} \quad (2.13)$$

CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse trabalho foi feita a investigação por comparação entre a energia elétrica gerada por um painel fotovoltaico fixo e com orientação ótima, como discutido no Capítulo 2, e um painel fixado a um sistema de rastreamento solar de forma a manter durante o dia área ativa deste dispositivo perpendicular aos raios solares incidentes.

3.1 LOCALIZAÇÃO DO LABORATÓRIO

Para medidas de radiação solar os instrumentos devem estar arranjados numa área horizontal livre de possibilidades de sombreamento. Neste trabalho foram utilizadas as locações do Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia (IF-UFBA), localizado na cidade de Salvador, no estado da Bahia - Brasil, cuja localização global é latitude 12°59' (S), longitude 38°30' (W) e a aproximadamente 30 m acima do nível do mar. O sombreamento por parte de outras edificações no terraço do IF-UFBA ocorre antes das 8 h e após as 17 h. Portanto é possível ter no mínimo 9 h por dia de insolação o que é suficiente para as avaliações pretendidas neste trabalho.

O terraço utilizado é horizontal, possui sistema para dreno de água da chuva e está a aproximadamente 20 m do solo. Logo abaixo há uma galeria de serviço que foi inteiramente posto ao dispor. Este corredor é protegido das intempéries do clima como chuva, Sol, umidade, etc., e possui pontos de rede elétrica disponíveis. Tubulações de PVC (Policloreto de Vinila) foram instaladas, ligando o terraço ao interior da galeria, com o intuito de trazer os diferentes cabeamentos, ligando os painéis solares ao interior onde estavam os equipamentos de controle e aquisição de dados.

3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema completo usado no trabalho experimental pode ser dividido em: coletores, sistema de controle e sistema de aquisição.

Os coletores são dois painéis fotovoltaicos, um fixo e outro móvel, ligados, cada um, a uma carga resistiva.

O controle do sistema móvel é feito por um computador pessoal (PC), no qual está instalado um programa dedicado, desenvolvido em linguagem de programação Visual Basic (VB). Uma interface de potência faz a ligação entre os motores que movimentam o painel solar e a porta paralela do computador. A etapa de potência foi montada para alimentar os motores a partir de uma fonte de corrente contínua.

Para o sistema de aquisição foi montada uma interface com conversores analógico para digital, que transformam os sinais das quedas de tensão, sobre os

resistores de carga ligados em série com os painéis, num sinal digital que poderá ser interpretado e armazenado pelo programa instalado no computador. A Figura 3.1 mostra um diagrama do sistema rastreador solar.

Foram usados nesse estudo dois painéis fotovoltaicos fabricados pela BP Solar, modelo MST 45 MV.

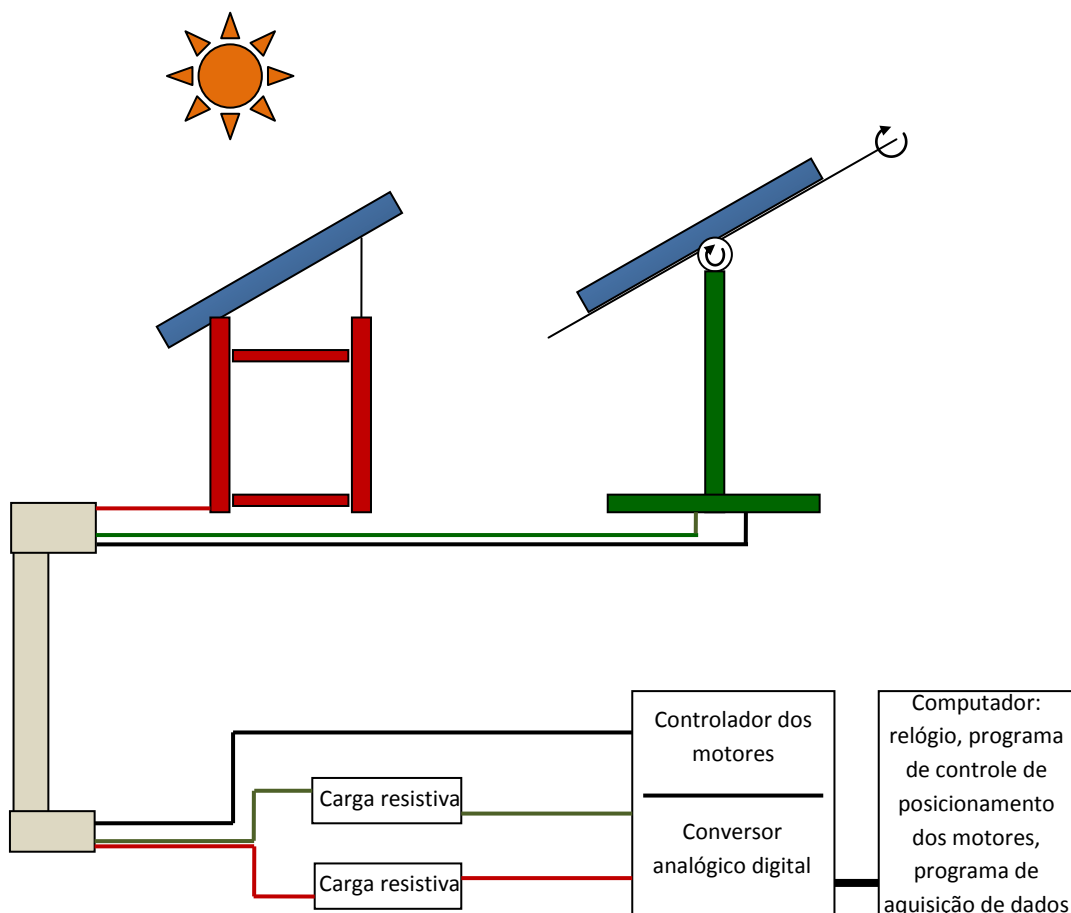


Figura 3.1 Diagrama de bloco dos painéis solares móvel e fixo e as etapas de controle e aquisição de dados.

3.2.1 Painéis coletores

As principais características destes painéis são (BP Solar, 2009):

- Potência máxima (P_{max}): 45 W
- Tensão em potência máxima (V_{mp}): 75 V
- Corrente em potência máxima (I_{mp}): 0,6 A
- Corrente de curto circuito (I_{cc}): 0,75 A
- Tensão em circuito aberto (V_{oc}): 100 V

**Valores medidos sob uma radiação de 1000 W/m^2 e a 25°C*

De acordo com o fabricante (BP Solar), esse painel é particularmente indicado para sistemas de bombeamento de água onde tensões elevadas são necessárias.

Para o transporte da corrente elétrica gerada pelos painéis até os resistores de carga, que fazem parte do sistema de medição, foram usados dois pares de cabos elétricos flexíveis de 1 mm² de área transversal e 7 m de comprimento. Os cabos foram passados através de um tubo de PVC de 100 mm de diâmetro, que os conduzem do terraço até o interior da galeria de serviço onde está instalada a instrumentação usada.

Os resistores de carga são uma associação em série de resistores de 10 W de potência. Essa associação cria um divisor de tensão com o qual é possível medir um sinal de tensão proporcional a corrente elétrica total gerada e assim determinar indiretamente a potência gerada pelo painel.

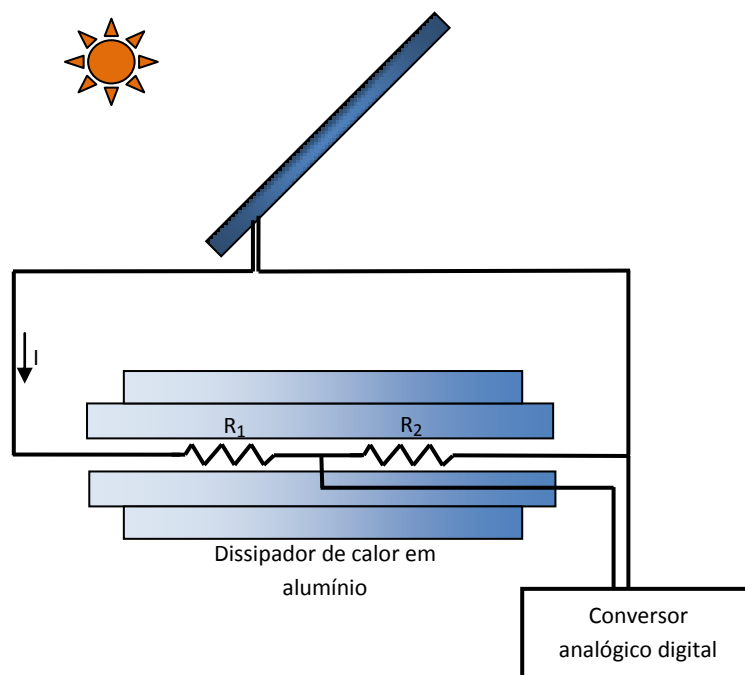


Figura 3.2 Diagrama de bloco dos resistores de carga junto ao dissipador de calor ligado ao ADC.

Os resistores foram revestidos com pasta térmica, material comumente usado para facilitar a transmissão de calor entre dispositivos elétricos e eletrônicos e um sistema de escoamento de calor. Os resistores foram então fixados em um dissipador em alumínio, como pode ser visto no diagrama mostrado na Figura 3.2, a fim de manter constante a temperatura do corpo do resistor e assim minimizar a variação da resistência do divisor durante as medidas.

A corrente (I) gerada pelo painel, que atravessa os resistores, pode ser medida indiretamente pelo valor da queda de tensão (V_{R2}) sobre a resistência R₂.

$$I = \frac{V_{R2}}{R_2} \quad (3.1)$$

Conhecendo os valores dos resistores R_1 e R_2 e a corrente I que flui através deles, é possível então calcular a potência gerada pelo painel usando a equação

$$P = (R_1 + R_2)I^2 \quad (3.2)$$

Os painéis fotovoltaicos foram montados sobre as duas diferentes estruturas. O painel fixo, mostrado na Figura 3.3, foi montado sobre uma estrutura em ferro em forma de mesa horizontal com 4 pernas. Essa mesa retangular tem altura de 50 cm em relação ao solo. Em um dos lados (ao longo do comprimento) foi instalado uma barra roscada com uma porca solidária à estrutura da mesa e a outra extremidade fixada na moldura de alumínio do painel. Deste modo foi possível, de forma manual, regular continuamente a inclinação do painel (máximo de 50°) em relação a horizontal.

O painel móvel, mostrado na Figura 3.4, também foi montado sobre uma estrutura em ferro. Um eixo de rotação foi integrado a estrutura, permitindo a movimentação do painel de forma a acompanhar a hora solar, ou seja, o movimento do Sol ao longo do dia. Outro eixo de rotação possibilita que o painel se mova para acompanhar o ângulo de declinação, que está relacionado com a movimentação do Sol ao longo do ano.

Os motores foram acoplados diretamente a cada um desses eixos, através de barras roscadas, sendo responsáveis então pela movimentação do painel. Os motores utilizados são alimentados por uma tensão constante de 12 V e consomem 1 A, são prova d'água, possuem velocidade de rotação da ordem de 90 RPM e permanecem mecanicamente travados quando o eixo está em repouso. Isso se deve ao fato do eixo interno está solidário a uma caixa de redução do tipo parafuso sem fim e coroa. Para diminuir o esforço dos motores foram utilizados contrapesos posicionados de forma contrabalançar o torque resultante, ver Figura 3.5.

A maioria dos painéis fotovoltaicos está etiquetada com os valores de potência, corrente e tensão máxima que o painel pode gerar em pleno Sol. Sem a etiqueta, entretanto, é possível determinar a potência de qualquer painel solar de forma simples.

A potência de um painel solar depende da resistência (R) da carga elétrica que está conectada. Em uma situação de circuito aberto (resistência infinita) o valor da tensão do painel solar será alto, mas não fluirá corrente e, portanto, nenhuma potência é gerada. Em condição de curto-circuito (resistência zero) a corrente flui, mas com tensão nula, novamente nenhuma potência é gerada. Estes resultados seguem todos da lei de Ohm,

$$V = R.I \quad (3.3)$$

que dá as relações entre tensão, corrente, resistência e potência. Utilizando resistores de potência, os quais suportam altas temperaturas, com valores diferentes e traçando o gráfico, tensão (V) *versus* corrente (I), para um mesmo nível de irradiância, é possível encontrar o ponto (I,V) para o qual a potência é máxima, uma vez que potência é calculada com a relação

$$P = V.I \quad (3.4)$$

ou seja, o ponto que forma o retângulo de maior área sobre o gráfico.

O painel adquirido para esse trabalho foi rotulado pelo fabricante como 45 W de potência máxima quando exposto a 1.000 W/m^2 e a 25° C . Estimando que devido a atenuação da atmosfera na localidade de Salvador, o painel desenvolva apenas 40 W de potência máxima e 0,5 A de corrente em potência máxima, em Sol a pino, foi escolhida uma resistência de carga com valor igual a $160 \, \Omega$. Assim, os resistores de carga utilizados para a realização das medidas de potência dos painéis tiveram valores de resistência iguais a $160 \, \Omega$.



Figura 3.3 Fotografia do painel fixo e sua estrutura.



Figura 3.4 Fotografia do painel móvel e sua estrutura.



Figura 3.5 Fotografia em detalhe do sistema de contrapesos e eixos de rotação que promovem sua orientação.

O painel fixo foi posicionado de forma que uma das suas arestas estivesse paralela ao eixo norte-sul terrestre. O painel foi posto fixo a 13° de inclinação para norte, uma vez que a latitude da sua localização é $12^\circ 59'$ (S). Para obter essa orientação inicial foi usado um nível de bolha, para garantir que o painel estivesse inicialmente na horizontal, em seguida a posição foi ajustada com a barra roscada. Este ângulo foi ajustado manualmente e conferido com um goniômetro.

O eixo que promove o movimento do painel móvel para a correção do ângulo de azimuth foi posicionado paralelamente ao eixo norte-sul da Terra com o auxílio de uma bússola magnética.

3.2.2 Módulo de controle

Os motores precisam periodicamente ser energizados com uma tensão constante de 12 V e corrente de 1 A para que seja realizada a correção do posicionamento do painel móvel. No controlador de potência dos motores (*driver*) foi utilizado o circuito integrado L298, fabricado pela STMicroelectronics, que possui internamente transistores em configuração de ponte H. A ponte H é um circuito composto por 4 transistores, permitindo que a corrente elétrica passe pela bobina do motor nos dois sentidos, bastando para tanto comutar a tensão ou bit de controle. Este arranjo suprime a necessidade do uso de chaves mecânicas ou relês para a comutação do

sentido de giro do motor ou até mesmo a utilização de fonte de alimentação simétrica ou duas fontes.

O L298 possui duas pontes H (Anexo 1) contidas a um único circuito integrado e suporta uma corrente máxima de 1,5 A em cada. Ligando as duas pontes H contidas no *chip* em paralelo, a corrente máxima que o conjunto suporta passa a ser o dobro, ou seja, 3 A. Assim foi utilizado um L298, ligando-se as duas pontes H em paralelo para cada motor por precaução, pois em caso de erro mecânico ou de manobra, o motor pode travar energizado e a corrente poderia exceder os 1,5 A suportados pelo *chip*. A Figura 3.6 mostra uma fotografia do circuito montado com o L298.

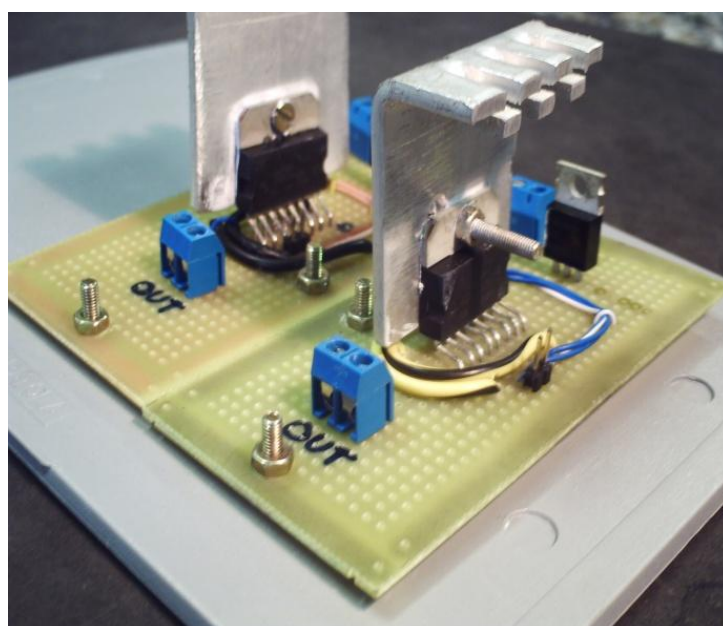


Figura 3.6 Fotografia da montagem do circuito de potência utilizado para o acionamento dos motores

Uma interface desenvolvida pelo Grupo de Instrumentação do Laboratório de Propriedades Óticas foi usada na etapa de aquisição de dados de corrente dos painéis solares e para fazer o controle do movimento dos motores. A posição do painel em função da hora do dia e do dia do ano é determinada por um algoritmo implementado em código de programa em linguagem Visual Basic. Este algoritmo calcula e atualiza a posição ao longo do dia. As variáveis lógicas de saída do programa de posicionamento comandam a rotação dos motores através dos sinais lógicos aplicados nos terminais de controle das pontes H.

A interface possui entradas para sinais lógicos vindos das chaves mecânicas de contato posicionadas na estrutura do painel móvel. Essas chaves, também conhecidas como chaves de fim de curso, informam os posicionamentos extremos do painel.

Uma chave conta-giros foi instalada no eixo de cada motor, a cada giro ela é acionada gerando um pulso na entrada da interface. Este sinal é usado no controle de posicionamento do painel.

Para digitalizar os sinais analógicos de queda de tensão nos resistores de medição de corrente foram usados dois conversores analógico digital (ADC) de 12 bits (ADS7804) fabricado pela Texas Instruments, Figura 3.7. A interface de aquisição foi conectada na porta paralela do computador pessoal. Todo o módulo de controle foi montado numa caixa, cuja foto é mostrado na Figura 3.8 e diagrama no Anexo 2.

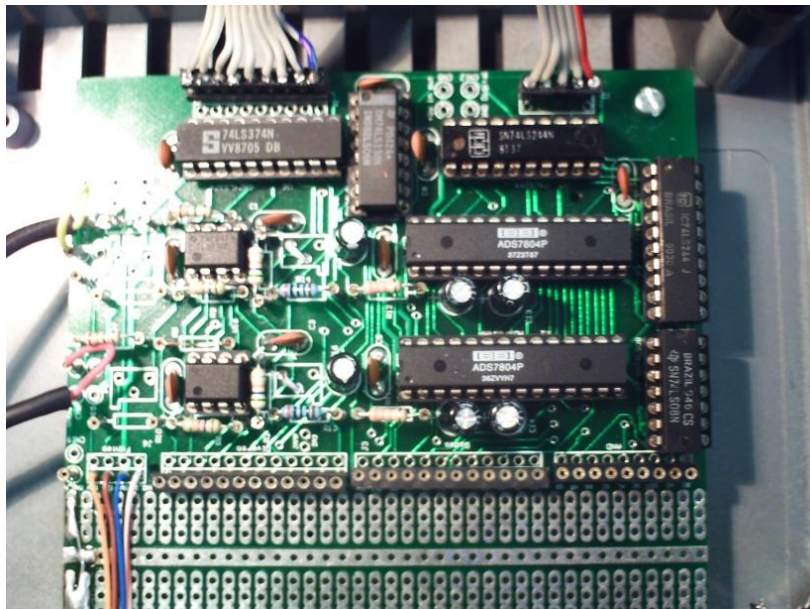


Figura 3.7 Fotografia da placa de aquisição e controle.



Figura 3.8 Fotografia da caixa de montagem com os conectores em seu painel frontal.

3.2.3 Programa de controle e aquisição de dados

Um programa foi desenvolvido em Visual Basic para realizar cálculos e encontrar as coordenadas do Sol na eclíptica e fazer a coleta dos dados da corrente gerada nos painéis fotovoltaicos.

A posição é dada pelo ângulo de azimute ou ângulo horário (ω) e o ângulo de declinação (δ), calculados através das relações discutidas no Capítulo 2. De posse dessas coordenadas o programa calcula a quantidade de giros necessários que cada motor deverá realizar a fim de posicionar a superfície do painel perpendicularmente aos raios solares incidentes. Para isso foi necessário fazer uma calibração da movimentação dos motores. Essa calibração foi feita posicionando inicialmente o painel na direção horizontal com o auxílio de um nível de bolha. Em seguida o painel foi movimentado, em torno do eixo que permite a correção do ângulo de azimute, para posição mínima até que o interruptor de fim de curso fosse acionado. Com o auxílio de um goniômetro fixado na estrutura que apóia o painel foi possível medir a inclinação do painel em relação a horizontal. Foram tomados dados relacionando o número de giros do eixo do motor e a inclinação da superfície do painel medida no goniômetro. De posse desses pontos foi possível traçar a curva de calibração para esse eixo. O mesmo procedimento foi usado para o eixo responsável pela correção do ângulo de declinação. O curso do eixo (ω) é de -65° a $+70^\circ$, onde 0° corresponde a horizontal. O curso do eixo da correção δ é de -36° a $+37^\circ$.

Como a curva de calibração do ângulo horário muda um pouco com a variação da declinação, foram feitas calibrações de posição do eixo ω para diferentes posições do eixo δ . Essas curvas de calibração são mostradas nas Figuras 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13.

Durantes o período de tomada de dados existiu uma variação máxima de até 7° do valor indicado pelo goniômetro em relação ao ângulo calculado para o eixo ω , principalmente no início e no fim dos dias. Para o eixo δ a variação máxima foi de 2° .

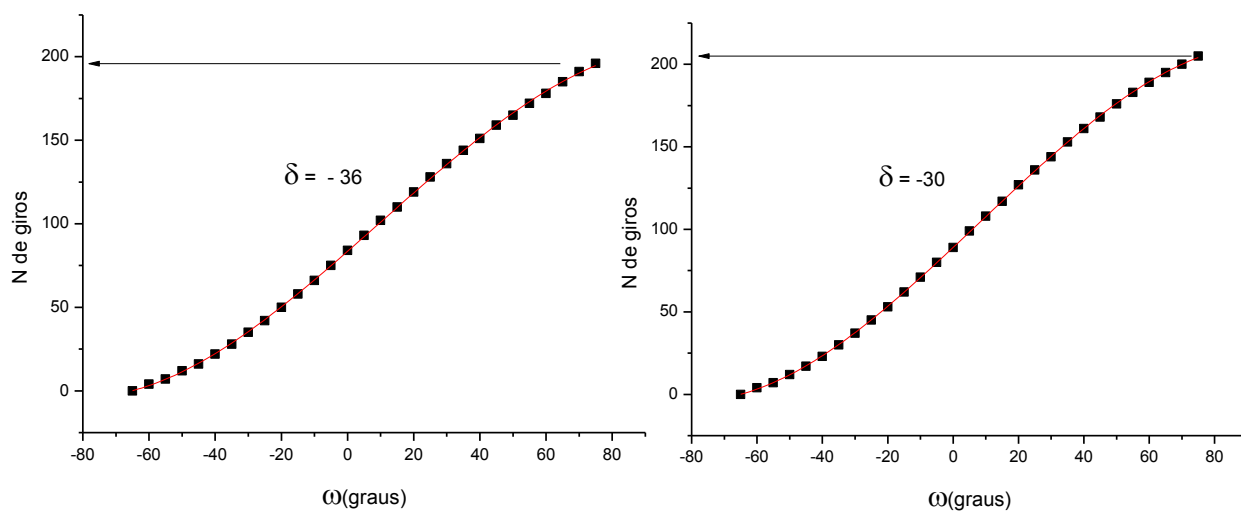


Figura 3.9 Curva de calibração ω para $\delta = -36$ e $\delta = -30$

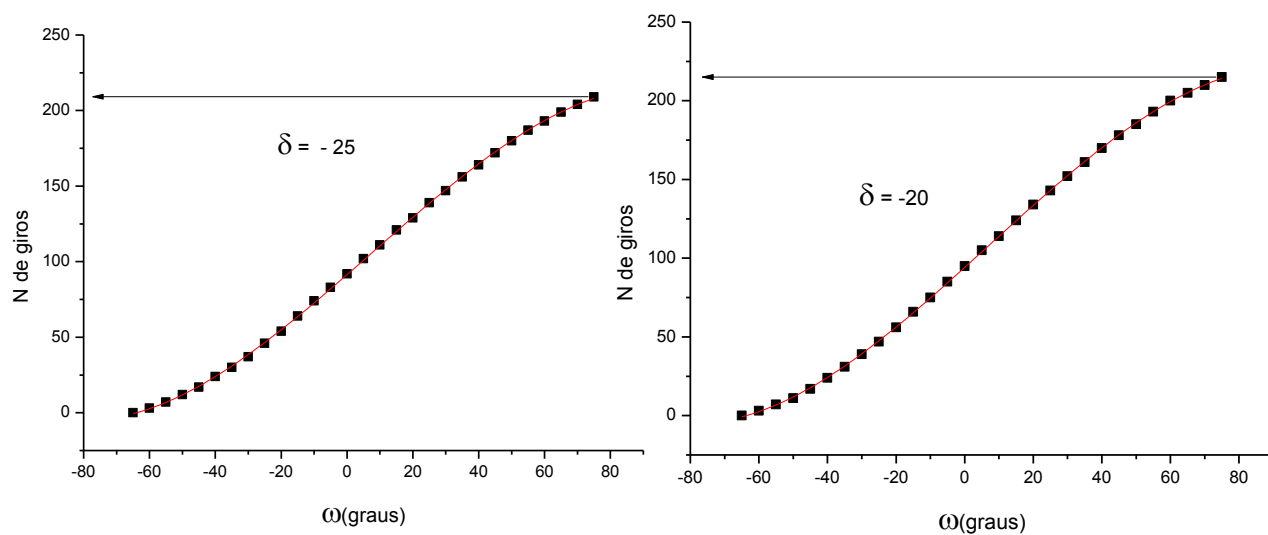


Figura 3.10 Curva de calibração de ω para $\delta = -20$ e $\delta = -25$

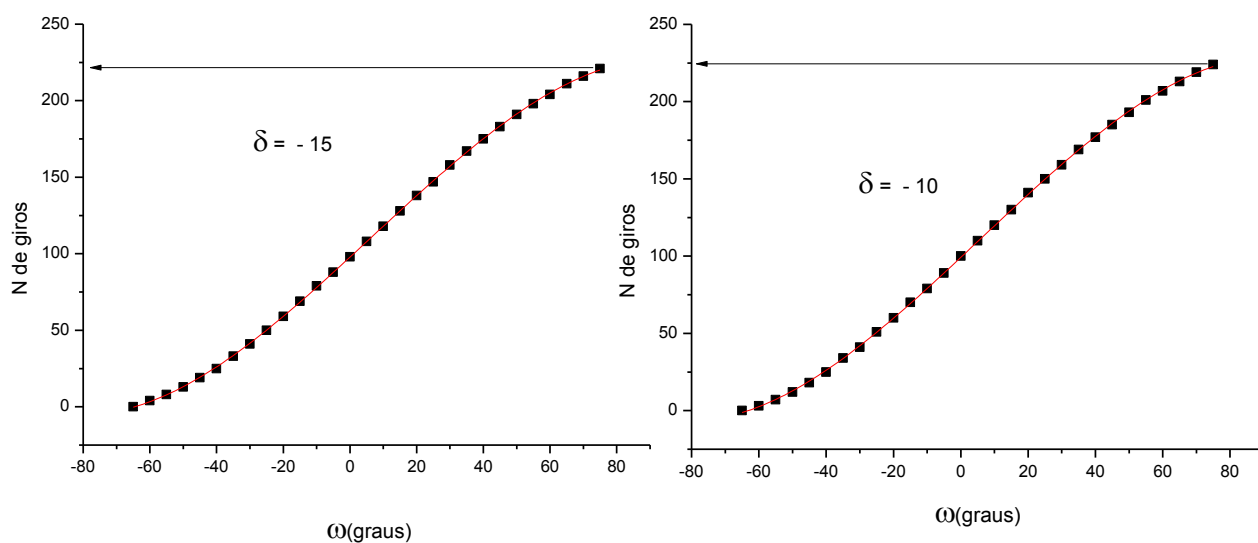


Figura 3.11 Curva de calibração de ω para $\delta = -15$ e $\delta = -10$

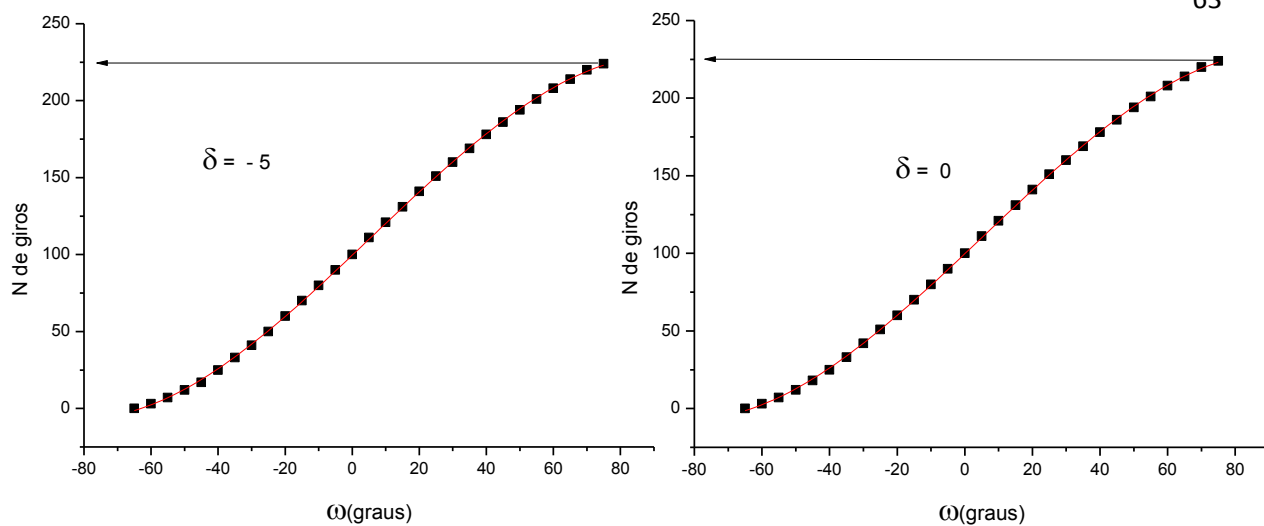


Figura 3.12 Curva de calibração de ω para $\delta = -5$ e $\delta = 0$

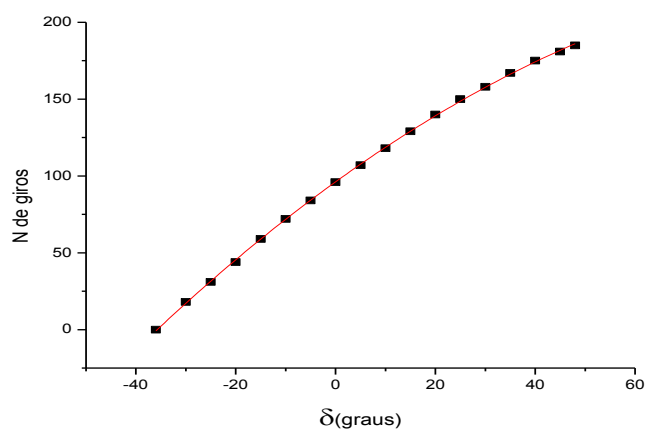


Figura 3.13 Curva de calibração para δ

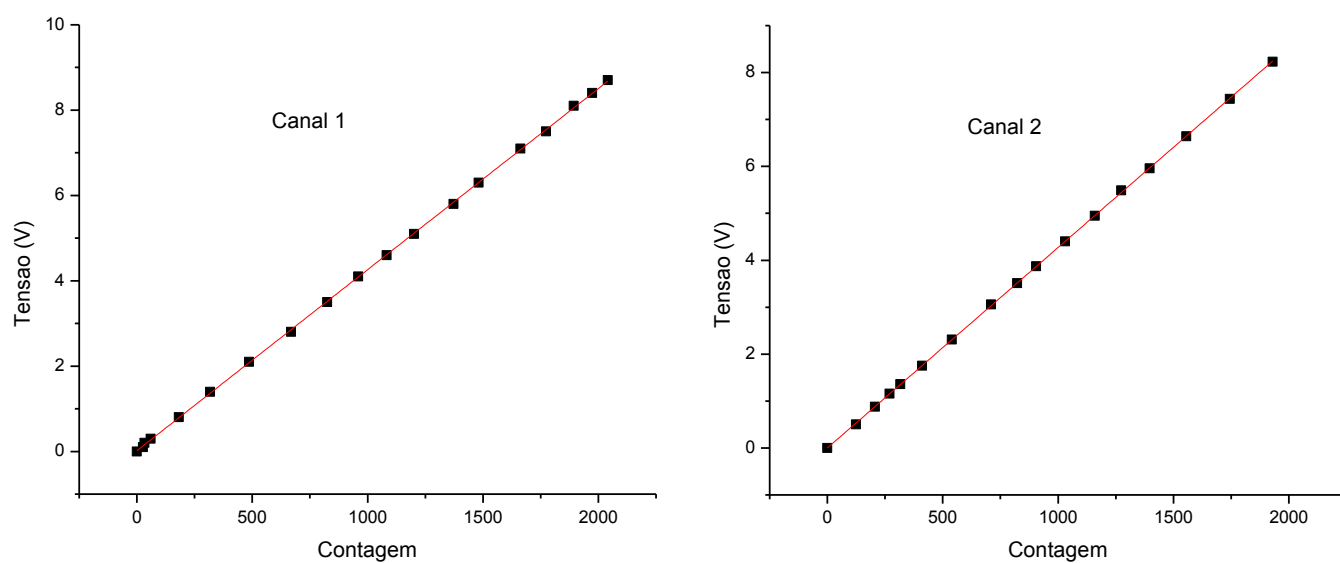


Figura 3.14 Curvas de calibração dos ADC

A queda de tensão proporcional a corrente dos painéis aplicada às entradas dos ADC's é convertida e manipulada pelo programa em unidades de contagens de ADC. Foi necessário então fazer uma calibração relacionando número de contagens com o sinal da tensão na entrada do amplificador ligado a entrada do ADC. Assim o programa passa a interpretar o sinal de queda de tensão nos resistores de carga como uma tensão e não mais como contagens. Foi feita a calibração dos dois canais, canal 1 do resistor de carga alimentado pelo painel fixo e o canal 2 do resistor de carga alimentado pelo painel móvel, Figura 3.14.

Para iniciar o programa, cuja imagem da tela principal é mostrada na Figura 3.15, é necessário indicar as coordenadas de latitude e longitude globais. O programa então verifica a data e a hora local, usando para tanto o relógio do sistema operacional, que neste caso foi o Windows XP Professional da Microsoft. O intervalo de tempo escolhido para a aquisição foi de 08:00 as 17:00 excluindo medidas durante o sombreamento do local de observação.

O programa inicialmente verifica se a hora está no intervalo escolhido e então calcula o ângulo de declinação e o ângulo de azimuth utilizando as equações apresentadas por Stine e Gayer (2001), mostradas no Capítulo 2. Em seguida orienta o painel para a posição zero, posições mínimas de cada eixo, determinadas por chaves de fins de curso. Então o programa envia um sinal de estímulo para cada motor, que movimenta o eixo responsável pela inclinação do painel. A chave conta-giros, posicionada ao lado de cada motor, envia pulsos para o programa através da placa de aquisição. Com a calibração, descrita anteriormente, o programa sabe quantos giros do eixo do motor são necessários para orientar o painel de acordo com o ângulo calculado. O motor da declinação é o primeiro a ser orientado.

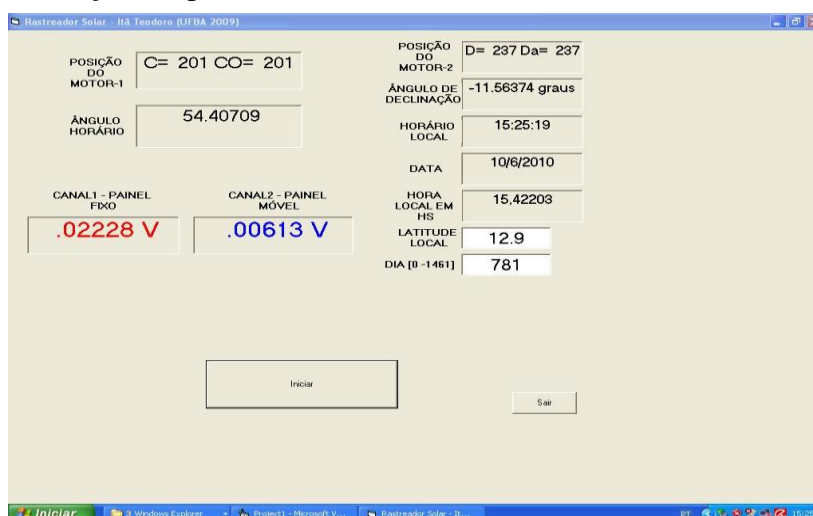


Figura 3.15 Imagem da interface do programa de controle do sistema de rastreamento solar

A cada 10 segundos o programa faz aquisição do sinal nos resistores de carga, salvando os valores de tensão e a hora num arquivo de texto com o nome referente a data da aquisição. Posteriormente refaz os cálculos para determinar novos valores para os ângulos ω e δ e em seguida verifica se a diferença entre esse novo valor e o valor da última correção é maior que 2° . Caso seja, uma nova correção de posição é feita.

Após as 17:00 a aquisição é interrompida e o motor ω retorna o painel para a posição inicial iniciando a correção e a aquisição a partir das 08:00 do dia seguinte. O fluxograma do programa utilizado é mostrado na Figura 3.16.

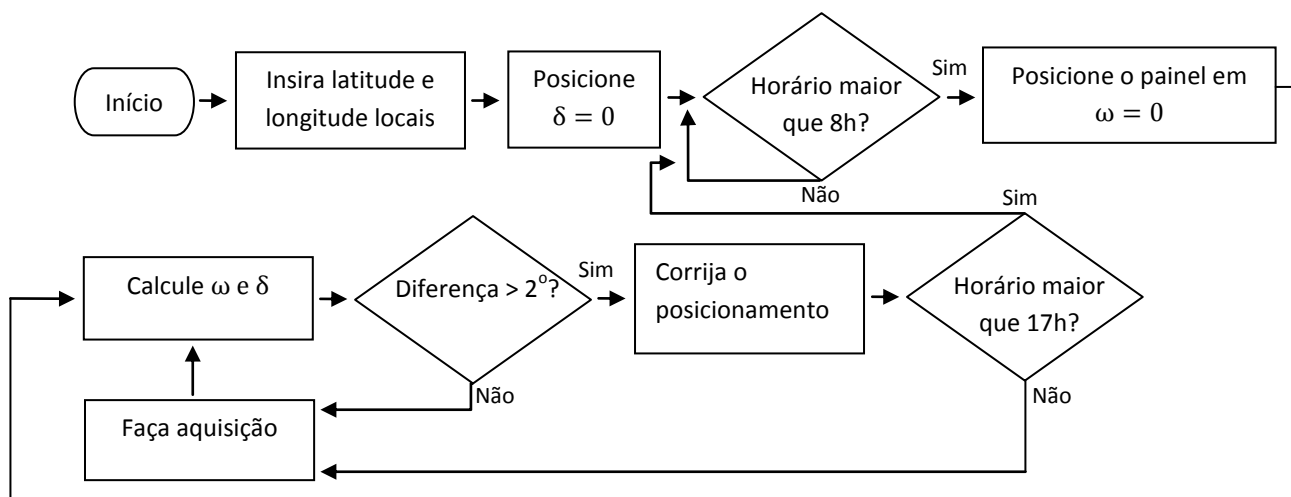


Figura 3.16 Fluxograma do programa de rastreamento solar

O computador pessoal (PC) utilizado tinha como configuração: 2 GB de memória DDR, processador da marca Intel Dual Core 1 GHz de frequência de relógio e instalado numa placa mãe da marca Asus com frequência de barramento de 333 MHz com sistema operacional Windows XP Professional.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DE DADOS

Durante vários dias do mês de fevereiro de 2010, após a calibração do sistema, os painéis foram expostos ao Sol para coleta de dados. O sistema foi ligado em 15 de fevereiro de 2010 e automaticamente, como programado, se manteve durante quinze dias fazendo as correções de posicionamento da orientação do painel móvel em relação ao Sol, medindo as tensões nos resistores de carga, salvando os dados num arquivo de texto e durante a noite recolhendo o painel para o posicionamento inicial do próximo dia. Através dos dados coletados foi possível traçar num gráfico, a potência instantânea gerada pelo painel em função da hora do dia, para os dois painéis e assim foi possível verificar a diferença.

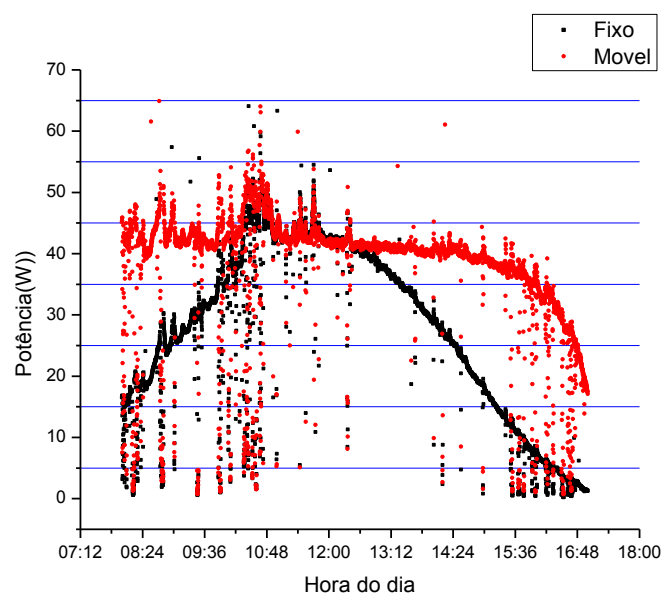


Figura 4.1 Gráfico de potência gerada pelos painéis ao longo dia 15/02/2010

O gráfico traçado na Figura 4.1 mostra a potência desenvolvida pelos painéis durante o período de 08:00 as 17:00 do dia 15/02, dia claro com poucas nuvens. Como o painel móvel se mantém perpendicular a incidência dos raios solares o efeito cosseno ou efeito Lambert, discutido no Capítulo 2, não se manifesta para este painel. Diferentemente do painel fixo, que vê sua eficiência cair significativamente, tanto para as primeiras, quanto para as horas finais de iluminação. A potência do painel móvel se mantém grande parte do dia em 43 W, valor bastante próximo das especificações do fabricante. Interpretando a integral da curva de potência contra tempo, como energia transformada pelo painel, temos que a energia fornecida pelo painel móvel, nesse dia,

foi 42% maior que a gerada pelo painel fixo. Um total de 1.167.074 J foram gerados pelo painel móvel, enquanto somente 817.373 J foram transformados pelo painel fixo.

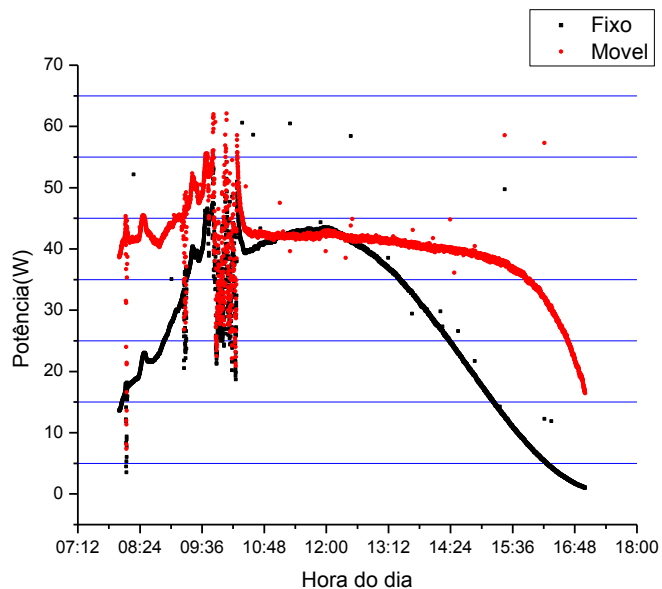
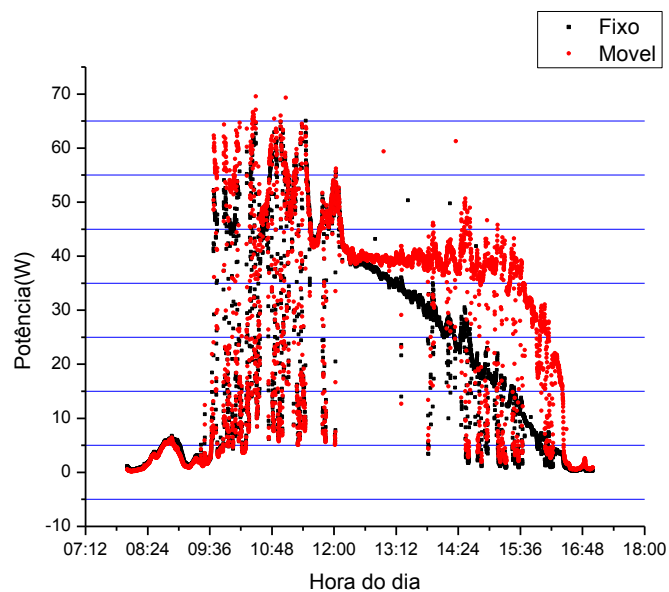


Figura 4.2 Gráfico de potência gerada pelos painéis ao longo dia 16/02/2010

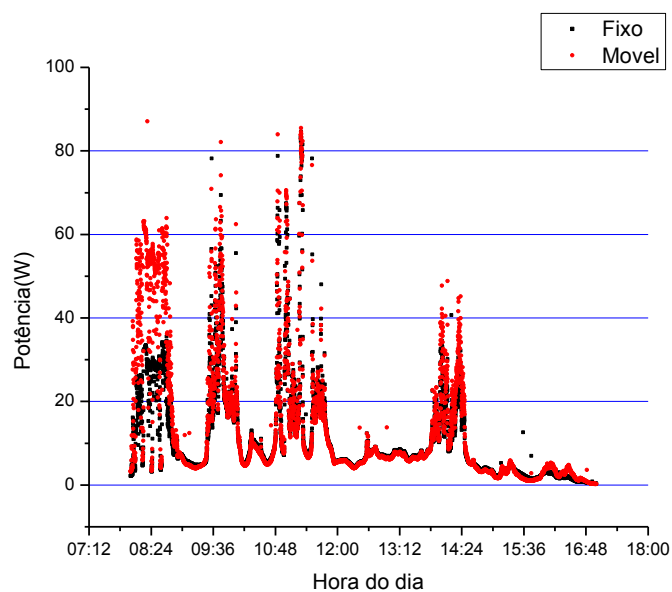
No dia 16/02/2010, também com poucas nuvens, o comportamento do gráfico obtido se manteve muito parecido com o do dia anterior, sendo que a diferença de energia entre o painel fixo e móvel foi de 41%, Figura 4.2. Ou seja, 1.223.779 J gerados pelo painel móvel e 862.143 J gerados no painel fixo.

Entre as 09:00 e as 10:00, observa-se um aumento na geração de potência maior do que a média experimentada entre 12:00 e 14:00, isso se deve a reflexão ocorrida nas nuvens. Estas estruturas atmosféricas, com alto grau de refletância, ao se aproximarem e se afastarem, aumentam o número de fótons sobre o painel, radiação suplementar que não chegaria ao painel num dia de céu claro típico.



**Figura 4.3 Gráfico de potência gerada pelos painéis
ao longo dia 18/02/2010**

A aquisição do dia 18/02/2010, Figura 4.3, sugere uma intensa massa de nuvens do início do dia, até 09:30, e o início de sua dissipação em seguida. Nesse dia foi registrado um aumento de 25% na eficiência em relação ao painel fixo. 801.303 J para o painel móvel e 638.452 J para o painel fixo.



**Figura 4.4 Gráfico de potência gerada pelos painéis
ao longo dia 22/02/2010**

O comportamento dos dados adquiridos na data de 22/02/2010, Figura 4.4, sugere uma intensa quantidade de nuvens no céu durante todo o dia, por isso um baixo índice de potência foi desenvolvida pelo painel. O painel fixo converteu 323.976 J de energia contra 384.250 J do painel móvel, o que corresponde a um aumento de 18% em relação ao painel fixo.

No dia 27/02/2010 os 1.057.662 J de energia captada pelo sistema móvel foi 40% superior aos 744.282 J captados pelo sistema fixo, ver Figura 4.5.

Na data de 28/02/2010 foi verificado um aumento de 37% da coleta de energia do painel móvel em relação ao fixo, num dia que começou com nuvens, mas teve o final da manhã e a tarde com céu claro. O painel móvel gerou 988.239 J e o fixo 721.491 J de energia, Figura 4.6.

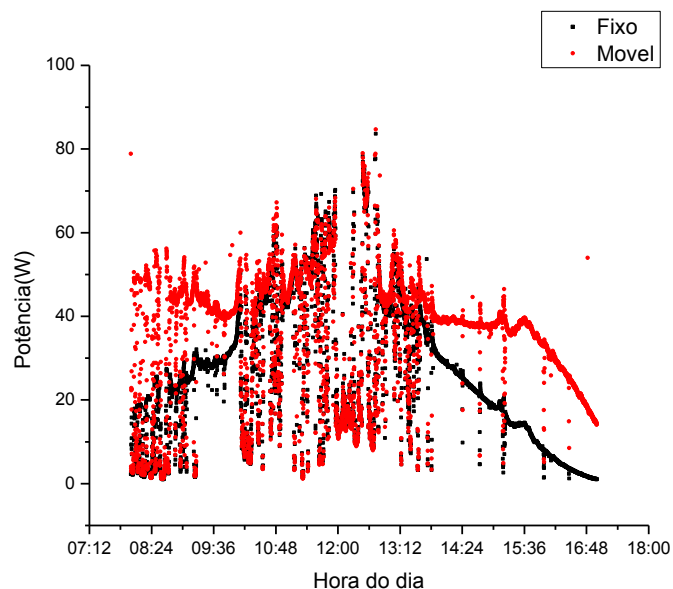
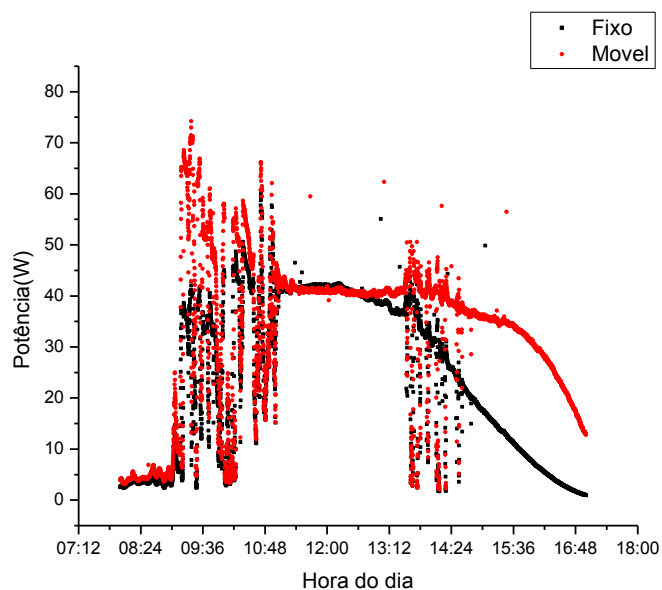


Figura 4.5 Gráfico de potência gerada pelos painéis ao longo dia 27/02/2010



**Figura 4.6 Gráfico de potência gerada pelos painéis
ao longo dia 28/02/2010**

Tabela 4 – Diferença percentual entre as energias captadas pelos painéis

Dia	Painel Fixo (J)	Painel Móvel (J)	Diferença (%)
14/fev	473.031	703.563	49
15/fev	817.367	1.166.987	43
16/fev	862.143	1.223.779	42
17/fev	853.165	1.263.441	42
18/fev	638.452	801.303	26
19/fev	724.004	937.504	29
20/fev	655.282	875.964	34
21/fev	649.031	912.528	41
22/fev	323.976	384.250	19
23/fev	470.546	622.714	32
24/fev	229.965	295.326	28
25/fev	403.335	551.167	37
26/fev	697.606	1.007.769	44
27/fev	744.282	1.057.662	42
28/fev	721.491	988.239	37

Na tabela 4 é mostrada a energia captada pelos painéis durante os dias de exposição e a diferença percentual entre elas que é em média $36 \pm 9\%$. Tomando como dias claros aqueles cujo painel fixo gerou mais que 700.000 J, a média da diferença entre os painéis fixo e móvel foi superior a $39 \pm 4\%$.

Para computar a energia gasta no posicionamento do painel móvel, tem-se que levar em conta os seguintes detalhes: o motor de ajuste da hora solar é acionado em média a cada 5 minutos durante as 9 horas em que o sistema está ativo e cada correção de posição leva aproximadamente 1 segundo. Ao fim do dia o painel retorna a posição inicial varrendo a eclíptica relativa a um dia, esse movimento leva em média 2 minutos. Somando o tempo total em que o motor está energizado, algo em torno de 230 s, e multiplicando por sua potência, 12 W, calcula-se a quantidade de energia utilizada pelo motor, 2.760 J. Esse valor corresponde a 0,6% da diferença de energia gerada pelo painel móvel em relação ao fixo de um dia claro como em 15/02/2010.

4.2 ANÁLISE DE CUSTOS

Como foi visto, o sistema móvel possui uma capacidade de captação de energia média de 39% maior que o sistema fixo em dias claros. Entretanto a eletromecânica utilizada para a movimentação do painel apresenta uma maior complexidade em sua construção além de um maior custo. As tabelas 5 e 6 apresentam os custos envolvidos na construção dos dois sistemas. O valor do computador pessoal foi substituído pelo custo de uma placa dedicada de controle, que pode ser embarcada no conjunto.

Tabela 5 – Tabela de custos de construção do sistema móvel

Quantidade	Unidade	Descrição dos produtos	Valor total em Reais
01	UN	Painel fotovoltaico BP Solar MST 45 W	750
01	UN	Placa de controle embarcada	50
01	UN	Placa de comando e aquisição	80
01	UN	Placa de controle dos motores	20
02	UN	Motor CC 12 W	50
		Ferragens	160
		Custo total	1.110

Tabela 6 – Tabela de custos de construção do sistema fixo

Quantidade	Unidade	Descrição dos produtos	Valor total em Reais
1	UN	Painel fotovoltaico BP Solar MST 45 W	750
		Ferragens	80
Custo total			850

O custo de construção do sistema móvel em relação ao fixo é 30% maior, contudo essa diferença é compensada com a sua capacidade de geração superior, em média de $39 \pm 4\%$ em dias claros. A instalação do sistema móvel custou 24.6 R\$/W e o fixo 26.2 R\$/W, o que corresponde a uma diferença maior que 6%. Esse resultado sugere a viabilidade econômica do sistema, uma vez que a diferença do custo de montagem é menor que o ganho proporcionado pela orientação automatizada do painel móvel. Ou seja, investir a diferença para automatizar o sistema promove uma geração de energia percentual maior que a compra proporcional de novos sistemas de painéis fixos.

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES

Foi construído um sistema mecatrônico capaz de sustentar um painel fotovoltaico, permitindo a movimentação em dois graus de liberdade para o acompanhamento da eclíptica. Este controle é feito por um computador (PC) a partir de um software dedicado que realiza rotinas apropriadas para calcular, a cada instante, o posicionamento solar, corrigindo, portanto, a orientação do painel móvel.

O sistema desenvolvido também é capaz de coletar dados da potência instantânea desenvolvida pelos painéis móvel e fixo, e conseqüentemente da energia diária captada.

Foi feita a comparação da energia gerada pelos painéis fixo e móvel durante quinze dias do mês de fevereiro de 2010 e verificou-se um aumento médio de $39 \pm 4\%$ em dias claros. O consumo energético dos componentes eletromecânicos significou apenas 0,6% desse ganho, apontando então para a viabilidade energética do sistema.

Apesar da robustez do material utilizado, o suporte mecânico móvel teve um desenho bastante simplificado, onde foram utilizados contrapesos para diminuir o esforço do motor. O acoplamento entre os motores e os eixos foi feito por parafusos sem fim, melhorando a exatidão nas correções de movimentação. Apenas um motor foi destinado ao posicionamento diário, o que conduziu a uma simplificação no código lógico de controle e uma diminuição no consumo elétrico do posicionador.

Foi utilizado um computador pessoal (PC) que serve de plataforma para o software de controle e uma placa controladora interligando o sistema de posicionamento do painel solar móvel ao computador. Esta não é a solução mais adequada para um sistema destinado a instalação em campo, mas se mostrou uma ótima alternativa para fins de estudo em laboratório. Em muitos sistemas discutidos na literatura são utilizados CLP ou micro-processadores dedicados.

O investimento para a implantação da solução eletromecânica de rastreamento do Sol teve custo aproximado de 24.6 R\$/W na instalação. Se levado em conta o aumento da capacidade geradora do painel móvel, o custo de instalação do painel fixo fica majorado, valendo 26.2 R\$/W, o que corresponde a uma diferença maior que 6%. Essa análise mostra a viabilidade de prover a orientação automática dos painéis, buscando soluções mecatrônicas simples.

PERSPECTIVAS

O sistema foi desenvolvido para acompanhar tanto a movimentação diária quanto a movimentação anual do Sol. Entretanto por limitações de tempo só foi possível fazer a avaliação do ganho energético diário. O trabalho poderia ser continuado mantendo-o funcionando durante 1 ano ou mais para uma avaliação mais detalhada da diferença de geração elétrica por parte dos painéis fixo e móvel.

Durante os testes as chaves de fins de curso escolhidas não se mostraram resistentes a chuva muito intensa. Estas poderiam ser substituídas por chaves magnéticas.

As articulações do sistema móvel apresentaram folgas, que ocasionaram uma pequena variação do ângulo calculado e o ângulo medido no goniômetro. Essas articulações poderiam ser revistas e corrigidas para diminuir as folgas, aumentando então a exatidão da movimentação do sistema.

Uma placa micro-controlada poderia ser desenvolvida e implantada ao sistema substituindo assim o uso do PC.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, S. (2004). The effect of using sun tracking systems on the voltage–current characteristics and power generation of flat plate photovoltaics. **Energy Conversion and Management** , pp. 1671-1679.
- ABDALLAH, S.; NIJMEH, S. (2004). Two axes sun tracking system with PLC control. **Energy Conversion and Management** , 45, pp. 1931-1939.
- ALVES, A. F. (2008). Tese (Doutorado) **Desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático para painéis fotovoltaicos** - Faculdade de Ciências Agrônômicas - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Botucatu-SP.
- ANEEL. (2005). **Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica**, (p. 33). Brasília.
- BONNET, D. (2003). **Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications**. (T. Markvart, & L. Castafier, Eds.) Arnstadt, Germany: Elsevier Ltd.
- BP SOLAR**. (2009). Acesso em 16 de fev de 2010, disponível em Site da BP Solar: <http://www.bp.com>
- CHANG, T. P. (2009). The gain of single-axis tracked panel according to extraterrestrial radiation. **Applied Energy** , 86, pp. 1074-1079.
- DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. (1980) **Solar Engineering of Thermal Processes**. A Wiley-Interscience Publication (John Wiley & Sons, Inc.)
- DU PONT. (2010). Acesso em 21 de Fevereiro de 2010, disponível em **Du Pont Photovoltaic Solutions**: http://www2.dupont.com/Photovoltaics/en_US/products_services/encapsulant/elvax_eva_resins.html
- FALCÃO, V. D. (2005). Dissertação (Mestrado) **Fabricação de células solares de CdS/CdTe**. Rio de Janeiro, RJ.
- FERRAZZA, F. (2003). **Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications**. (T. Markvart, & L. Castafier, Eds.) Nettuno, Italy: Elsevier Ltd.
- FERRIANI, V. M.; DONATO, C. D.; SANTOS, B. D.; GUIMARÃES, E. J.; JUNIOR, C. L.; D’AMORE, R. (2006). Estudo do subsistema de suprimento de energia do satélite

universitário ITASAT. **Anais do 12 encontro de iniciação científica e pos-graduação do ITA**. São José do Campos.

FILHO, K. D.; SARAIVA, M. D. (2004). **Astronomia e Astrofísica** (2ª ed.). São Paulo, SP: Editora Livraria da Física.

FRAIDENRAICH, N. (2002). Tecnologia solar no Brasil: os próximos 20 anos. **Sustentabilidade na Geração e Uso da Energia no Brasil: os próximos vinte anos**. Campinas .

FRÖHLICH, C.; BRUSA, R. (1981). Solar radiation and its variation in time. **Solar Physics**, 74, p. 209.

GEVORKIAN, P. (2008). **Solare power in the engineer's complete design resource**. McGraw-Hill eBooks.

HAMMONS, B. E. (1980). **Patente Nº 4225781**. Estados Unidos da America.

LAMM, L. O. (1981). A New Analytic Expression for the Equation of Time. **Solar Energy** , 26 (5), p. 465.

MATSUURA, O. T.; PICAZZIO, E. (2006). In: E. d. Paulo (Ed.), **Astronomia: Uma visão geral do unveso** (2ª edição ed., pp. 81-102). São Paulo, SP.

POPPE, M. K. (2002). **Universalização do Acesso à energia elétrica no Brasil: características, oportunidades e desafios. Sustentabilidade na Geração e Uso de Energia no Brasil: os Próximos Vinte Anos**. Acesso em 20 de Fevereiro de 2010, disponível em [HYPERLINK](http://www.cgu.unicamp.br/energia2020/papers/paper_Poppe.pdf)
http://www.cgu.unicamp.br/energia2020/papers/paper_Poppe.pdf

POULEK, V.; LIBRA, M. (1998). New solar tracker. **Solar Energy Materials and Solar Cells** , pp. 113-120.

RAU, U.; SCHOCK, H. W. (2003). **Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications**. (T. Markvart, & L. Castafier, Eds.) Universitat Stuttgart, Germany: Elsevier.

REHMAN, S.; BADER, M. A.; AL-MOALLEM, S. A. (Novembro de 2007). Cost of solar energy generated using PV panels. **Renewable & Sustainable Energy Reviews** , pp. 1843-1857.

STINE, W. B.; GAYER, M. (2001). **Power of Sun**. Acesso em 08 de Julho de 2009, disponível em <http://www.powerfromthesun.net/>

SUNGUR, C. (2009). Multi-axes sun-tracking system with PLC control for photovoltaic. **Renewable Energy** , 34, pp. 1119-1125.

TIBA, C. (2000). **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos**. Ed. Universitária da UFPE. Recife, PE

WOOLF, H. M. (Set de 1968). On the Computation of Solar Evaluation Angles and the Determination of Sunrise and Sunset Times. **National Aeronautics and Space Administration** .