

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PLANOS COM SEGUIDOR SOLAR

Maurício M. Oliveira – maurimadeira@hotmail.com

Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica

3.4 Outros Componentes de Sistemas Fotovoltaicos

Resumo. A conversão de radiação solar em eletricidade por módulos fotovoltaicos planos é feita geralmente com sistemas fixos, mas uma importante parcela de instalações está utilizando seguidores solares de um ou dois eixos e apresentam um aumento significativo na produção de energia. Este trabalho descreve a montagem de um seguidor solar azimutal (um eixo vertical) aplicado a módulos fotovoltaicos e compara a produção energética do mesmo com um sistema fixo. Os parâmetros monitorados para comparação foram: corrente fotogerada pelo sistema fixo e móvel, radiação global e temperatura dos módulos para correções; ambos os sistemas foram montados com elevação igual à latitude local (30°). O ganho energético com a utilização do seguidor azimutal chegou a 24% em dias de céu parcialmente limpo, quando ocorre alto índice de radiação direta. O seguidor solar foi desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da UFRGS, incluindo parte mecânica e controle eletrônico (hardware e software) do equipamento; o impulsor do sistema é um pequeno motor elétrico. O seguimento solar é realizado a cada 15 minutos ($3,75^\circ$), um sensor ótico com haste de sombreamento determina se o conjunto está voltado para o Sol, a posição de retorno (leste) no final do dia, $\frac{1}{2}$ dia (norte) e final de curso (oeste) é determinada por sensores magnéticos. O aumento de produção energética alcançado pelo conjunto com seguimento solar em períodos fora do central (11:00h as 13:00h) chegou a 38%, em relação ao fixo, o que pode ser determinante em alguns projetos.

Palavras-chave: Energia Solar, fotovoltaica, seguidor solar.

1. INTRODUÇÃO

A conversão de energia radiante solar por conjuntos de módulos fotovoltaicos planos, em energia elétrica, sofre grande influência da orientação dos mesmos em relação ao Sol, Kacira M. et al.(2004). Usualmente os módulos de sistemas fixos são instalados com inclinação igual à latitude local (ϕ) e direcionados para o norte (instalação no hemisfério sul). O ângulo de incidência dos raios solares sobre a superfície dos painéis deve ser perpendicular, se possível, para que o rendimento do sistema seja maximizado através do melhor aproveitamento da parcela de radiação direta. Para isto usam-se sistemas de seguimento solar com movimento nos dois eixos (azimute e elevação solar), ou em um só eixo, vertical ou horizontal, Poulek et al.,1998.

Neste trabalho foi montado um conjunto com dois módulos fotovoltaicos sobre um equipamento de seguimento solar com movimento no eixo vertical (correção do azimute). O sistema foi desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da UFRGS (hardware e software). Outros dois módulos foram instalados em uma estrutura fixa voltada para o norte. A inclinação das duas montagens é de 30° (igual à latitude local). Deste modo, foi possível comparar, através de medidas em vários dias, o rendimento de ambas as montagens e usar uma seqüência de cálculos (Duffie e Beckman,1991) que estimam a energia radiante sobre um painel fixo ou móvel (com inclinação fixa), através de medições da radiação global horizontal.

O ganho do sistema móvel em relação ao fixo chegou a 24% no dia 07/03/2008 e em alguns períodos do dia este valor foi de até 38% o que pode ser muito útil em determinadas aplicações ou em picos de demanda energética. A análise comparativa dos sistemas mostra que em dias de pouca ou nenhuma nebulosidade o uso de seguimento solar proporciona um aumento significativo de energia produzida (maior que 24%). Em dias nublados as duas montagens apresentam praticamente a mesma eficiência. A escolha da montagem, com ou sem seguimento solar, deve verificar as condições de manutenção, instalação, demanda energética e custos para sua implementação, pois o ganho energético para um igual número de módulos será normalmente favorável ao sistema móvel.

2. TIPO DE MONTAGEM, GEOMETRIA, ÂNGULOS IMPORTANTES E EQUAÇÕES

Neste item são descritas as montagens com a geometria e ângulos envolvidos e o conjunto de equações (Duffie e Beckman, 1991) que são necessárias para este trabalho.

2.1 Montagem fixa, geometria, ângulos e equações de uso geral

A montagem usual para sistemas de conversão fotovoltaica é a fixa, os módulos são fixados em uma estrutura estática e com inclinação fixa, geralmente igual à latitude local. O direcionamento dos painéis pode ser escolhido de acordo com as necessidades do projeto, mas normalmente são direcionados para o norte quando a instalação é no hemisfério sul e para o sul quando a instalação é no hemisfério norte.

Na Fig.1 é apresentada a montagem fixa com direcionamento qualquer e ângulos envolvidos em sua geometria.

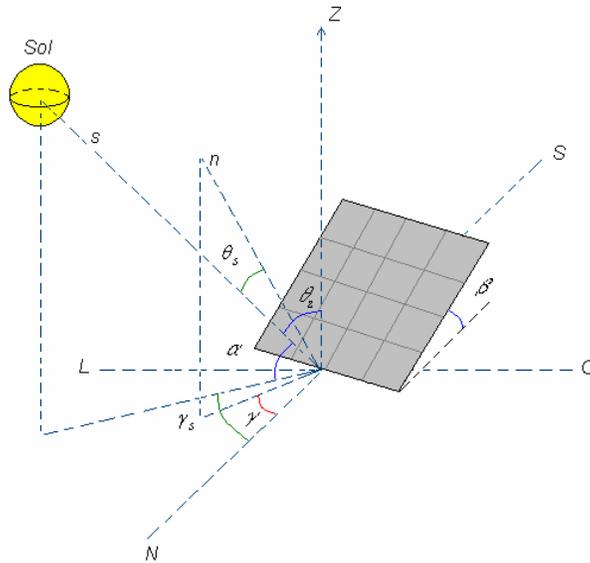


Figura 1 – Geometria e ângulos para um módulo fixo

Os ângulos e elementos auxiliares são os descritos:

Z = zênite (reta perpendicular ao plano horizontal onde está o observador).

θ_s = ângulo de incidência direta dos raios solares.

θ_z = ângulo de zênite.

α = ângulo de altitude solar.

β = inclinação do painel fotovoltaico em relação ao plano horizontal local.

γ_s = azimute solar.

γ = azimute da superfície.

s = reta que liga o centro da Terra ao centro do Sol.

n = reta normal ao painel.

N, S, L e O, são os pontos cardeais: norte, sul, leste e oeste.

As equações que determinam e relacionam estes ângulos são:

$$\cos \theta_s = \cos \beta \cos \theta_z + \sin \beta \sin \theta_z \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (1)$$

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega \quad (2)$$

$$\alpha = 90 - \theta_z \quad (3)$$

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \alpha \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \phi} \quad (4)$$

onde δ representa o ângulo de declinação solar que é determinada pela Eq.(5) (fórmula reduzida),

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[\frac{2\pi}{365} (dn + 284) \right] \quad (5)$$

dn é o dia Juliano (exemplo: data 10/02, $dn = 41$, número de dias do ano, até a data considerada).

O ângulo horário (ω) é determinado através do horário local, que é convertido em graus, cada hora cheia equivale a 15° , com a convenção de ser negativo na parte da manhã e positivo na parte da tarde, ao meio-dia vale 0° , adotada a Eq.(6):

$$\omega = \{[(H - 12)60] + \text{min}\} \frac{1}{4} \quad (6)$$

onde H é hora local de 0 a 24, e min valor em minutos. O resultado estará convertido em graus e com o sinal correspondente. Para utilizar a hora indicada pelo relógio se deve corrigir o horário local antes da conversão, através da equação de tempo solar verdadeiro (TSV):

$$TSV = H + [4(L_{st} - L_{oc})] + E_t \quad (7)$$

onde L_{st} é a longitude padrão (na hora de Brasília é 45°), L_{oc} longitude local (se estiver a leste de L_{st} é positiva, ao oeste negativa), e E_t equação do tempo (em minutos) determinada pela Eq.(8):

$$E_t = 229,18(0,000075 + 0,001868 \cos \tau - 0,032077 \text{sen} \tau + -0,014615 \cos 2\tau - 0,04089 \text{sen} 2\tau) \quad (8)$$

o valor de ângulo do dia (τ), em radianos, é calculado pela Eq.(9).

$$\tau = (dn - 1) \frac{2\pi}{365} \quad (9)$$

Uma relação importante que será usada é o fator geométrico (R_b) conforme Duffie et al (1991), é determinado pela Eq.(10).

$$R_b = \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_z} \quad (10)$$

O ângulo de amanhecer (ω_s), ou seja, momento que a radiação solar atinge uma superfície horizontal é dado por:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (11)$$

e o ângulo de amanhecer para superfícies inclinadas (ω_{st}) é dado pela Eq.(12):

$$\omega_{st} = \cos^{-1}[-\tan \delta \tan(\phi \pm \beta)] \quad (12)$$

o sinal que acompanha β será positivo se estiver no hemisfério sul, caso contrário será negativo; o ângulo de nascimento do Sol a ser usado, será o que apresentar o menor valor. Se necessário, o número de horas do dia (Nd) pode ser facilmente determinado pela Eq.(13).

$$Nd = \frac{2}{15} \omega_s \quad (13)$$

2.2 Montagem com seguimento solar (eixo vertical, correção do azimute), geometria, ângulos e equações

O equipamento de seguimento solar utilizado neste trabalho tem movimento único no eixo vertical, direção leste-oeste (movimento aparente do Sol), desta forma o ângulo de azimute solar estará coincidindo com o ângulo de azimute da superfície e o conjunto de painéis fotovoltaicos estará voltado para o Sol. A inclinação dos painéis é fixa e igual a latitude local.

A Fig.2 mostra a geometria e os ângulos envolvidos neste tipo de montagem.

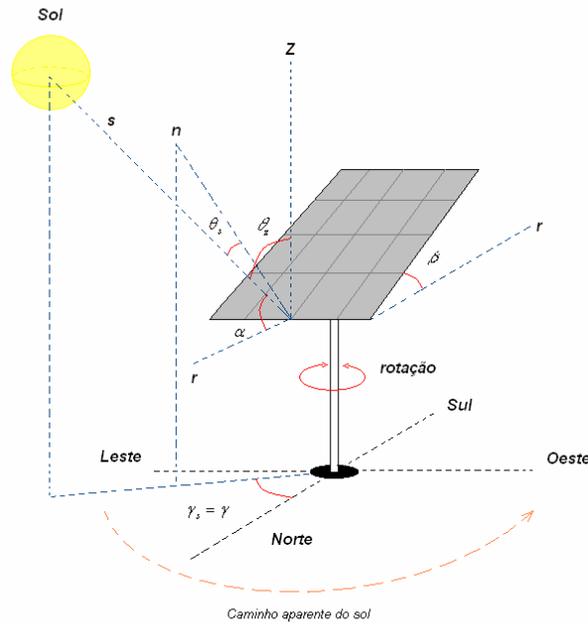


Figura 2 – Seguimento solar, correção do azimute

A Fig.2 apresenta como novos elementos a reta r , reta auxiliar que é paralela ao plano local e o ângulo de incidência direta (θ'_s) para o seguimento solar. O conjunto de equações que descrevem os ângulos desta montagem:

$$\cos \theta'_s = \cos \beta \cos \theta_z + \text{sen} \beta \text{sen} \theta_z \quad (14)$$

$$R'_b = \frac{\cos \theta'_s}{\cos \theta_z} \quad (15)$$

$$\gamma_s = \gamma \quad (16)$$

3. CÁLCULO DE IRRADIAÇÃO HORÁRIA SOBRE UMA SUPERFÍCIE INCLINADA FIXA, OU EM MOVIMENTO, A PARTIR DE MEDIÇÕES DA RADIAÇÃO GLOBAL (I_G).

Para calcular os valores da irradiação solar para uma superfície inclinada fixa ou em movimento, será usado um conjunto de equações para determinar as componentes direta e difusa (horizontais) do conjunto de medições da radiação global feitas por um piranômetro Kipp & Zonen modelo CM11. Lembrar que a irradiação global é a soma da irradiação direta e difusa ($I_G = I_b + I_d$). Após, serão determinados os valores para as componentes direta, difusa e refletida para superfícies inclinadas e conseqüente valor da irradiação horária para as mesmas.

O fator de relação entre a irradiação global horária (I_G) na superfície terrestre e a irradiação extraterrestre horária (I_o) é chamada de transmitância atmosférica horária (k_t) ou índice de claridade, e calculada pela Eq.(17).

$$k_t = \frac{I_G}{I_o} \quad (17)$$

Outra relação importante é a fração difusa que é determinada pela Eq.(18):

$$k_d = \frac{I_d}{I_G} \quad (18)$$

onde I_d é a irradiação difusa horária.

O valor da irradiação extraterrestre horária (I_o), considerando o ângulo horário central da hora é calculada usando a Eq.(19):

$$I_o = I_{sc} E_o \cos \theta_z \quad (19)$$

onde I_{sc} é a constante solar cujo valor é 1367 Wm^{-2} e E_o é o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre que é determinado pela Eq.(20):

$$E_o = 1 + 0,033 \cos \left[2\pi \left(\frac{dn}{365} \right) \right] \quad (20)$$

Para uma melhor estimativa da parcela difusa foi usado o modelo de correlação de Orgill et al (1977), que relaciona a fração difusa, principalmente, com o índice de claridade. A expressão que determina o valor do k_d é a Eq.(21).

$$\frac{I_d}{I_G} = \begin{cases} 1 - 0,249k_t & \text{para } 0 \leq k_t < 0,35 \\ 1,577 - 1,84k_t & \text{para } 0,35 \leq k_t \leq 0,75 \\ 0,177 & \text{para } k_t > 0,75 \end{cases} \quad (21)$$

Com o valor da irradiação difusa horizontal obtida com a Eq.(21), se determina através do modelo de Perez et al.(1987) a irradiação difusa para uma superfície inclinada ($I_{d\beta}$), conforme a Eq.(22):

$$I_{d\beta} = I_d \left[\frac{1}{2} (1 + \cos \beta) (1 - F_1) + F_1 \left(\frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_z} \right) + F_2 \sin \beta \right] \quad (22)$$

onde F_1 e F_2 são parâmetros determinados pelas Eq.(23) e Eq.(24), juntamente com a Tab.1.

$$F_1 = F_{11}(\varepsilon) + F_{12}(\varepsilon)\Delta + F_{13}(\varepsilon)\theta_z \quad (23)$$

$$F_2 = F_{21}(\varepsilon) + F_{22}(\varepsilon)\Delta + F_{23}(\varepsilon)\theta_z \quad (24)$$

Tabela 1 – Coeficientes do modelo Perez

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

onde o parâmetro de transparência (ε), adimensional, é calculado com a Eq.(25):

$$\varepsilon = \frac{I_d + I_b}{I_d} \quad (25)$$

I_b é a irradiação direta (normal à superfície horizontal). O parâmetro de brilho (Δ), também adimensional, é determinado pela Eq.(26):

$$\Delta = \frac{mI_d}{I_{on}} \quad (26)$$

onde a irradiação extraterrestre normal ($I_{on}=I_{sc}E_o$) e m é a massa de ar (pode ser calculada por $m=sec\theta_z$).

Para o cálculo da irradiação terrestre global horária em uma superfície inclinada fixa (I_β), consideram-se as componentes de irradiação direta ($I_{b\beta}$), difusa ($I_{d\beta}$) e refletida ($I_{r\beta}$), todas para esta inclinação (β), conforme a Eq.(27).

$$I_\beta = I_{b\beta} + I_{d\beta} + I_{r\beta} \quad (27)$$

A componente difusa inclinada é calculada com a Eq.22. A refletância do solo é considerada isotrópica, assim o valor da componente refletida é calculado com a Eq.(28):

$$I_{r\beta} = \frac{1}{2} I_G \rho (1 - \cos \beta) \quad (28)$$

onde (ρ) é o valor do albedo (refletância) do entorno da instalação. O valor da irradiação direta inclinada é determinada pela Eq.(29).

$$I_{b\beta} = I_b \left(\frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_z} \right) = I_b R_b \quad (29)$$

Para finalizar, o cálculo da irradiação sobre uma superfície inclinada em movimento ($I_{\beta m}$) é dada pela Eq.(30):

$$I_{\beta m} = I_{d\beta} + I_{r\beta} + I_{b\beta m} \quad (30)$$

e a irradiação direta inclinada para uma superfície em movimento ($I_{b\beta m}$) é calculada com a Eq.(31).

$$I_{b\beta m} = I_b \left(\frac{\cos \theta'_s}{\cos \theta_z} \right) = I_b R'_b \quad (31)$$

4. SEGUIDOR SOLAR, MECÂNICA E ELETRÔNICA

4.1 Mecânica do seguidor solar com movimento único no eixo vertical

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

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

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

O cálculo da relação de transmissão entre polias é dado pela Eq.(32), seus elementos são visualizados na Fig.3:

$$n_1 D m_1 = n_2 D m_2 \therefore i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{D m_2}{D m_1} \quad (32)$$

onde n_1 e n_2 número de rotações por minuto (rpm) na polia 1 e na polia 2 respectivamente, $D m_1$ e $D m_2$ é o diâmetro médio da polia 1 e 2, nesta ordem, i é o índice de relação entre polias.

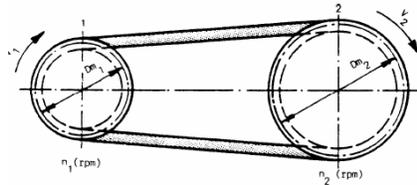


Figura 3 – Elementos de relação entre polias

Na Fig.4 são mostrados detalhes do sistema de polias, braço horizontal de sustentação dos painéis fotovoltaicos e motor impulsor do seguidor solar.



Figura 4 – Polias, braço horizontal e motor impulsor.

A Fig.5 mostra o seguidor solar com módulos fotovoltaicos, instalado junto ao prédio anexo do Laboratório de Energia Solar e detalhes da instalação de módulos fixos no telhado.



Figura 5 – Seguidor com módulos fotovoltaicos instalados

4.2 Eletrônica de controle do seguidor solar

O sistema de controle eletrônico do seguidor usa um micro-controlador (μC) da família 8051, que faz o gerenciamento de todas as funções do sistema, com isto a implementação do circuito se torna confiável, simples e de baixo custo; as funções controladas são:

- Sensoriamento de posição dos painéis (leste, $\frac{1}{2}$ dia e oeste), início e fim de curso.
- Sensoriamento de luz do dia e noite.

- Sensoriamento de posição dos painéis em frente ao Sol.
- Controle do motor e reversão de sentido do mesmo (leste-oeste).
- Não movimentação do sistema em períodos do dia com céu nublado (ausência de radiação direta).
- Rotina de ajuda para ajuste de sensores magnético e ótico.
- Rotinas de temporização.

O equipamento usa três sensores magnéticos do tipo *reed switch*, que determinam através de ajuste prévio, a posição leste (início de curso), meio-dia e oeste (final de curso). Um sensor ótico (fototransistor) com haste de sombreamento é usado para posicionar o conjunto em frente ao Sol; o mesmo sensor com mudança de sua polarização pelo μC determina se é dia e se o índice de radiação é satisfatório.

O ajuste de posicionamento do seguidor é feito de 15 em 15 minutos ($3,75^\circ$). Se ocorrer um dia nublado ou com baixo índice de radiação direta, o sistema detecta esta situação e após um período programado o equipamento se movimenta até a posição meio-dia, ou fica onde estiver. No final de cada dia o sistema se posiciona na posição leste e aguarda o nascer do Sol para um novo ciclo. O maior erro de posicionamento do seguidor para um dia sem nuvens é menor que o ângulo de espera para movimentação ($3,75^\circ$), com pouca influência sobre o ganho do conjunto.

Para a redução da velocidade do motor, além da relação de polias, foi implementado um circuito de controle eletrônico por largura de pulsos usando um circuito integrado do tipo 555. Este é um circuito que gera um sinal de onda quadrada com variação de sua frequência e largura de pulsos. Com este circuito e com uma etapa de controle de potência usando um transistor de tecnologia MOSFET para alta tensão e corrente (500 V-14 A), modelo IRFP450, foi obtida alimentação pulsada (efeito de uma chave liga-desliga rápida) para o motor de corrente contínua (impulsor) e assim se reduziu a velocidade do mesmo para menos de 1 rpm. A reversão do motor é feita através de dois relés que mudam sua polarização, sendo que todo o gerenciamento dos sinais é feito pelo μC . A Fig.6 mostra detalhes dos sensores magnéticos, sensor ótico e placa de controle do seguidor solar.

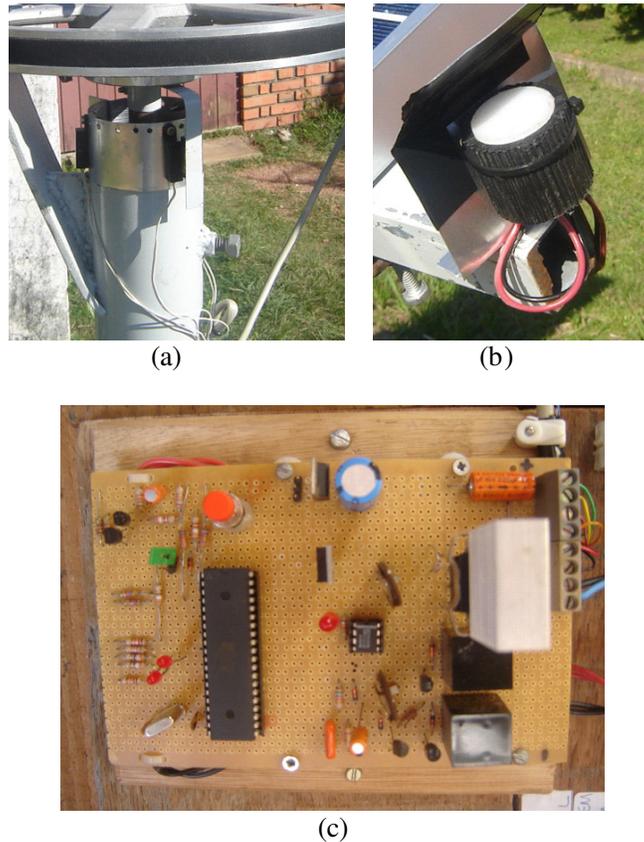


Figura 6 – Sensores magnéticos (a), sensor ótico com haste de sombreamento (b) e placa de controle (c)

5. MONTAGEM EXPERIMENTAL E RESULTADOS

O objetivo do experimento foi determinar através da análise de dados coletados pelo conjunto de sensores o ganho energético de um sistema com seguimento solar (correção do azimute) com elevação fixa e igual à latitude local, em relação a um sistema fixo com orientação norte e com a mesma elevação.

5.1 Descrição da montagem experimental

Foi montado um sistema de aquisição de dados usando a unidade HP 34970A (*Data Acquisition/Switch Unit*), que faz a varredura e a leitura de todos os sensores e instrumentos empregados neste experimento; o armazenamento e gerenciamento do sistema é feito por um computador pessoal (PC), o *software* utilizado é o *HP BenchLink Data Logger*. Na Tab.2 são descritos os sensores e equipamentos de medidas utilizados na aquisição das informações.

Tabela 2 – Características de equipamentos e sensores

Equipamento	Grandeza	Escala	Exatidão
HP 34970A	Tensão	100mV	$\pm 0,04\text{mV}$
HP 34970A	Tensão	1V	$\pm 0,000047\text{V}$
HP 34970A	Tensão	10V	$\pm 0,0004\text{V}$
HP 34970A	Tensão	100V	$\pm 0,0051\text{V}$
Piranômetro Kipp & Zonen	Radiação Global		$\pm 30\text{Wm}^{-2}$
Sensor PT100	Temperatura		$\pm 0,3^{\circ}\text{C}$
Shunt H&B (20A, 300mV)	Corrente	20A	$\pm 0,5\%$
Shunt H&B (30A, 150mV)	Corrente	30A	$\pm 0,5\%$
Células de Referência (CIEMAT)	Intensidade de radiação	Célula móvel Célula fixa	$\pm 30\text{Wm}^{-2}$

A montagem em paralelo dos conjuntos de módulos fotovoltaicos móvel e fixo, as ligações dos equipamentos, sensores, sistema de aquisição e gerenciamento são vistos na Fig.7, bem como o fluxo das informações coletadas.

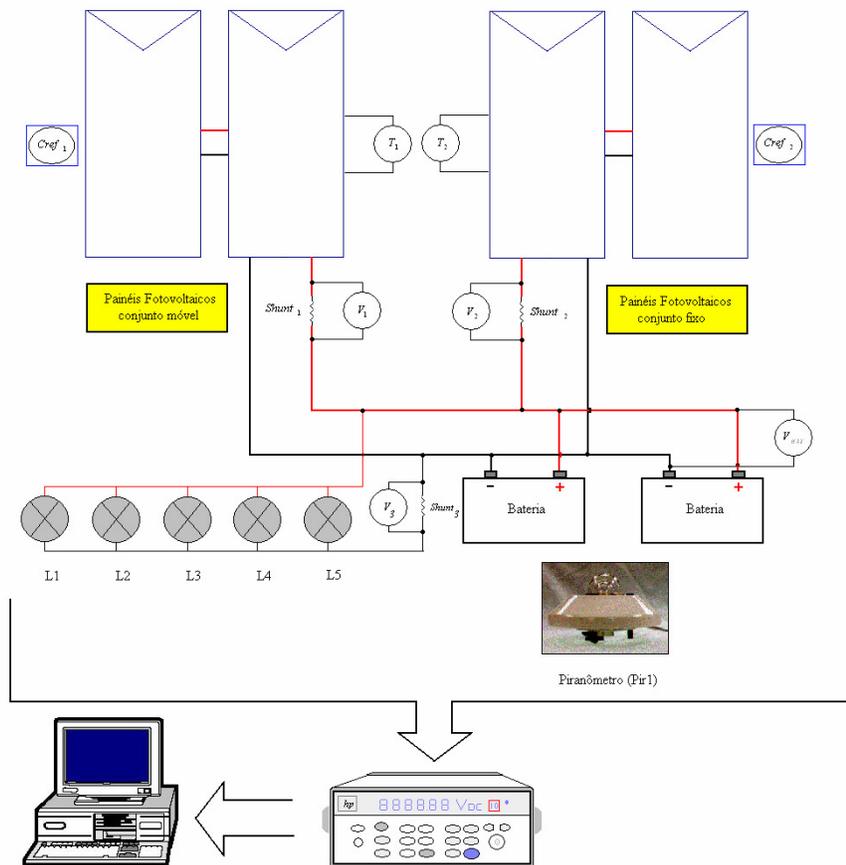


Figura 7 – Diagrama da montagem do experimento

O modelo dos módulos fotovoltaicos utilizados é KC85T da Kyocera. Foram montados dois conjuntos com dois módulos cada (em paralelo); o conjunto fixo foi instalado no prédio anexo ao Laboratório de Energia Solar, com inclinação de 30° , direção norte, o outro conjunto foi instalado no seguidor azimutal desenvolvido para este trabalho com a mesma inclinação. As características deste modelo de módulo são especificadas na Tab.3. Os valores das

características elétricas são para um espectro de massa de ar de 1.5, temperatura da célula de 25°C e irradiância de 1000Wm⁻².

Tabela 3 – Características do módulo KC85T

Potência máxima (P _{máx})	87 Watts
Tensão de máxima potência (V _{máx})	17,4 Volts
Corrente de máxima potência (I _{máx})	5,02 Amper
Tensão de circuito aberto (V _{oc})	21,7 Volts
Corrente de curto circuito (I _{sc})	5,34 Amper

(Fonte: kyocera.2008)

Os sensores de temperatura foram fixados a um módulo de cada conjunto fotovoltaico. As células de referência foram instaladas, no conjunto fixo e no conjunto com seguimento, ambas com elevação de 30° e sensores de temperatura para correção das leituras de irradiância. O piranômetro foi instalado na posição horizontal ao lado do conjunto fixo. Os *shunts* foram instalados para medir a corrente fotogerada pelo conjunto fixo e móvel, individualmente. Também foi medida a corrente elétrica consumida pelas cargas utilizadas.

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

Com esta montagem foi obtido o total de energia produzida pelo sistema fixo e móvel em cada dia de medição.

6. RESULTADOS

No período de 18/02/2008 a 07/03/2008, foram coletadas pelo sistema descrito informações sobre radiação global, irradiância (Wm⁻²) sobre o conjunto de módulos fixos e móveis e a quantidade de energia gerada em cada sistema. Este intervalo de tempo se caracterizou por dias parcialmente nublado a nublado com chuvas, com isto se conseguiu verificar o perfeito funcionamento do seguidor azimutal mesmo em dias de pouca radiação solar. Com os dados coletados foi possível verificar o aumento da energia convertida mesmo em dias não favoráveis ao sistema azimutal; em dias de grande visibilidade (alto *K_t*), o ganho energético correspondeu ao previsto por cálculos teóricos.

Para análise neste trabalho o dia 07/03/2008 foi o escolhido, pois apresentou períodos de céu limpo e momentos de pequena nebulosidade, sendo assim é possível observar o funcionamento do seguidor solar e apresentar as curvas de irradiância e potência convertida pelos conjuntos de módulos. Também a partir da radiação global foram calculados os valores de irradiação para o sistema fixo e móvel a partir do conjunto das equações descritas nos itens 2 e 3 deste trabalho.

Na Fig.8 apresentam-se as curvas de irradiância medida pelo piranômetro e irradiância medidas pelas células de referência.

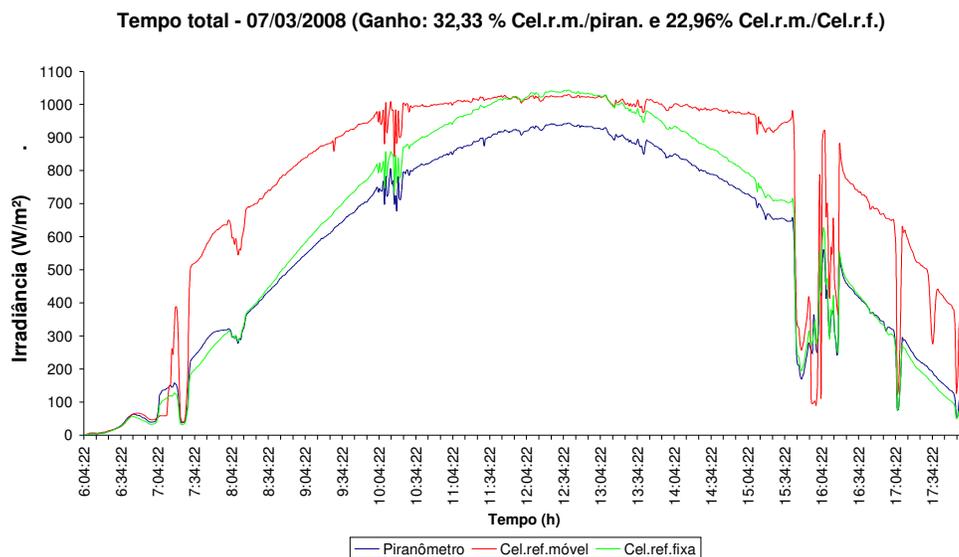


Figura 8 – Comparação entre irradiância global, irradiância sobre o conjunto móvel e fixo

O seguimento aumentou a energia convertida pelo sistema em 23% em relação ao sistema fixo. Nas Fig.9 e Fig.10 se observam as curvas (teórica) geradas a partir da radiação global comparadas com as medidas.

Comparação: horizontal, inclinada real e inclinada calculada (07/03/2008)

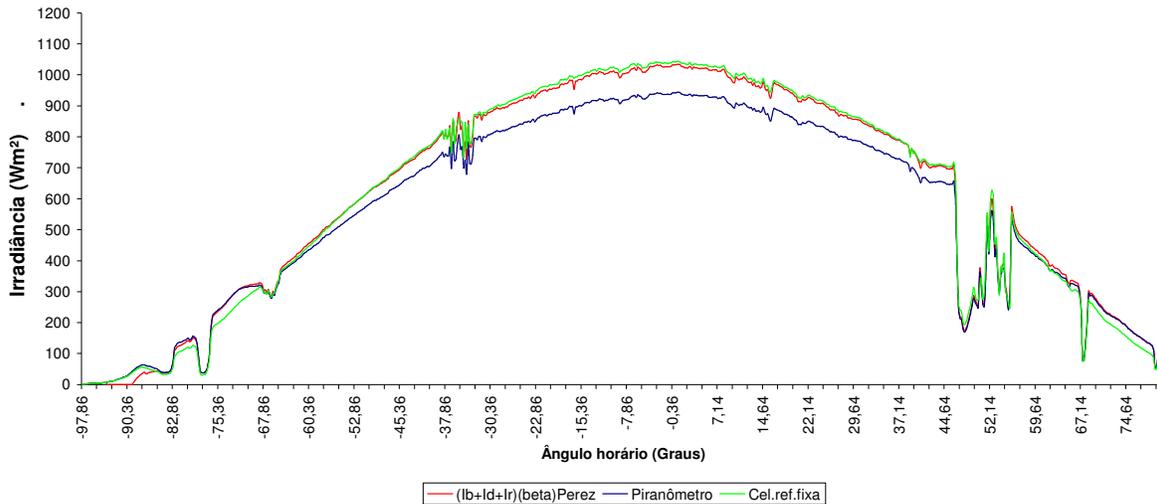


Figura 9 – Curvas medidas e calculada (Perez)

Curva célula de referência móvel e calculada (Perez)

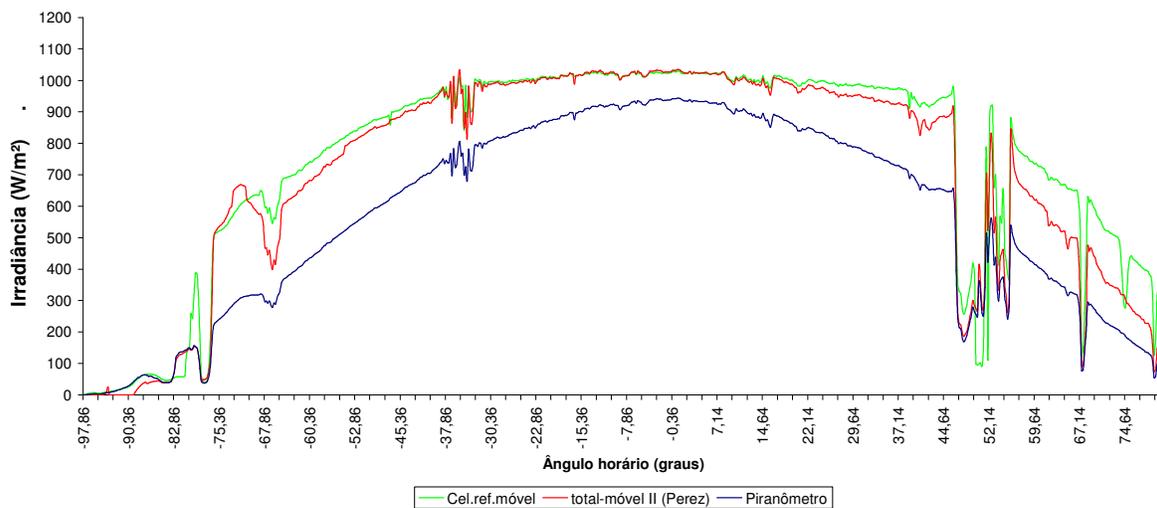


Figura 10 – Curva medida (cel.ref.móvel), irradiância global e calculada (Perez)

A diferença entre as curvas (medida e calculada) se deve principalmente à radiação direta incidente no conjunto móvel, pois o ângulo de incidência direta está sendo corrigido pelo seguidor solar, enquanto a curva calculada está sendo estimada por medidas de radiação que chega a um plano horizontal (piranômetro).

As curvas da potência produzida em ambos os conjuntos e tensão da bateria são vistas na Fig.11, o aumento de produtividade do sistema com seguimento foi de 24% em relação ao sistema fixo. No período do amanhecer até as 11:00h o ganho chegou a 38%, no período central (11:00h as 13:00h) alcançou 2,5% e no período das 13:00h ao entardecer chegou a 27,4%, estes valores mostram a importância do seguimento solar para horários em que os sistemas fixos perdem grande parcela da radiação direta. Em aplicações de sistemas fotovoltaicos, onde a maior demanda energética recaia em um dos períodos de maior produção de conjuntos com seguimento solar, este pode ser um indicativo de uso destes, mas o aumento de número de módulos fotovoltaicos também deve ser analisado. A energia produzida pelo sistema fixo foi de 0,98 kWh/dia e pelo conjunto móvel 1,21 kWh/dia.

Quando há predominância da radiação difusa em dias totalmente nublados, os sistemas apresentam a mesma eficiência e o conjunto de seguimento solar não deve se mover.

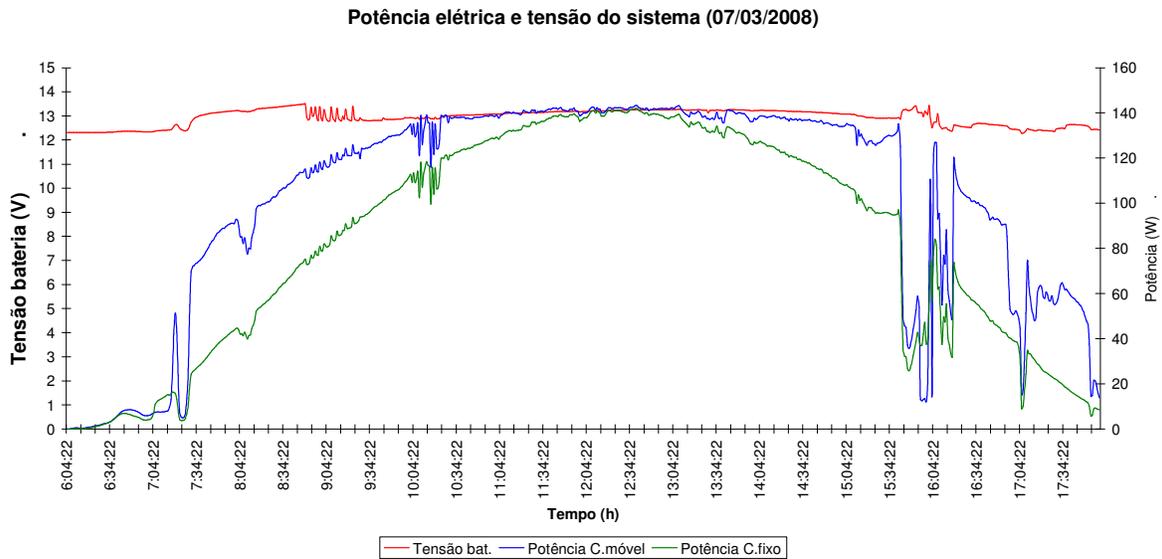


Figura 11 – Gráfico das curvas tensão da bateria e potência dos conjuntos (C.m.-móvel e C.f.-fixo)

7. CONCLUSÕES

O trabalho mostra que sistemas com seguimento solar (correção azimutal), mesmo de construção simples, aplicado a módulos fotovoltaicos planos, incrementam o ganho energético em relação aos sistemas fixos com parcelas importantes de energia fotogerada, podendo apresentar ganho energético superior a 24%. Também se verifica ganho importante de conversão fotovoltaica nos períodos fora da faixa central, onde o seguimento solar se destaca. Também se mostrou adequado o conjunto de equações que estimam, a partir da radiação global medida, as curvas de radiação sobre um painel fixo ou móvel, comparadas com as curvas experimentais.

REFERÊNCIAS

- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons.
- Kacira, M., Simsek, M., Babur, Y., and Demirkol, S., 2004. Determining optimum tilt angles and orientation of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey. *Renewable Energy*, vol. 29, pp.1265-1275.
- Kyocera, 2008. Informativo KC85T. <http://kyocerasolar.com.br/site/modulosolar.html>, capturado em 16/01/2008.
- Orgill, J.F., Hollands, K.G.T., 1977. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy*, vol.19, pp. 357-359.
- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., Menicucci, D., 1987. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy*, vol.39, pp. 221-231.
- Poulek, V., Libra, M., 1998. New solar tracker. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol.51, pp.113-120.

PERFORMANCE OF A SOLAR TRACKING SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC MODULES

Abstract. Most of the photovoltaic plants make use of stationary systems. However an important portion of the installations employ solar tracking systems (either in one or two axis) in order to maximize the energy conversion. This work describes the development of an azimuthal solar tracker and compares the performance of a photovoltaic panel employing such tracker with a stationary panel. The measured parameters were electric current, solar irradiation and temperature of the modules. Both systems have the same slope, equal to the local latitude (30°). The energy yield of the panel with the tracker, in partially clear days, was 24% superior to the stationary system. The solar tracking was developed at the Solar Energy Laboratory of UFRGS, including mechanics parts and electronic control (hardware and software). The tracker was driven by a small electric motor. An optical sensor determines whether the module is perpendicular to direct solar radiation. The position of the tracker is adjusted each 15 minutes (3,75°). The east, north and west positions are determined using magnetic sensors. The energy yield of the panel with tracker, in periods of the day before 11:00 and after 13:00, was 38% superior to the stationary system.

Keywords: Solar energy, photovoltaic, solar tracking.