

# SEGUIDOR SOLAR PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

**Christian de Freitas Faricelli**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Poli/USP  
Cfaricelli@yahoo.com.br

**Resumo.** *O presente trabalho apresenta o desenvolvimento do protótipo de um seguidor solar para painéis fotovoltaicos com dois graus de liberdade, o qual permite movimentação em relação as diferentes horas do dia através de um sistema eletro-mecânico, e também às estações do ano, manualmente. O projeto inclui revisão bibliográfica sobre movimentação solar, energia solar e painéis fotovoltaicos, que juntamente com o estudo de mecanismos eletromecânicos permitiram a elaboração do dimensionamento mecânico e controle eletrônico do sistema. O estudo realizado fornece a base de conhecimento e identificação da necessidade de ser suprida, destacando-se a relevância social do uso da energia solar fotovoltaica no contexto da universalização energética através do desenvolvimento sustentável com aproveitamento das características regionais. O presente estudo se alia ao crescimento da geração fotovoltaica, que desde 1990 mundialmente, alcançou taxas anuais superiores a 20 %. Apesar de os investimento na geração fotovoltaica serem dependentes de incentivos governamentais, melhorias de eficiência, tecnologias emergentes e reduções no custo de fabricação dos sistemas demonstram uma competitividade crescente em relação a fontes convencionais de geração energética. No Brasil, destaca-se o uso de sistemas fotovoltaicos em comunidades rurais e/ou isoladas, principalmente no Norte e Nordeste, em projetos implementados por programas governamentais. Para a determinação teórica do ganho obtido com o uso de sistemas móveis em comparação com sistemas fixos foi utilizado o modelo Perez et Al foi utilizado, que apresentou ganhos em torno de 15% para o protótipo, acréscimo relevante em determinados tipos de projetos.*

**Palavras chave:** Seguidor solar, mecanismo eletromecânico, energia solar fotovoltaica.

## 1. Introdução

No Brasil, a busca pela universalização energética e utilização dos recursos renováveis regionais demonstram o vasto campo de utilização da energia solar. Essa afirmação é comprovada pelos inúmeros projetos e utilizações já existentes no país que, juntamente com apoio técnico, científico e financeiro recebido de diversos órgãos e instituições nacionais e estrangeiras, proporcionam o atendimento de comunidades isoladas da rede elétrica e desenvolvimento regional. Pode-se destacar, por exemplo, o uso de coletores solares para aquecimento de água em instalações residenciais e comerciais, sobretudo nas regiões sul e sudeste, e de células fotovoltaicas para geração de eletricidade e bombeamento de água, em comunidades isoladas, principalmente no Norte e Nordeste.

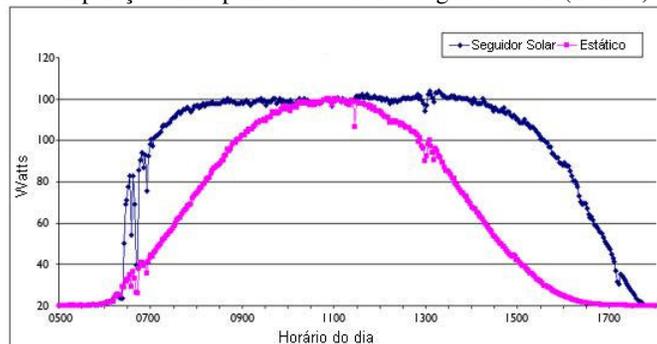
Dentre as características positivas de células fotovoltaicas pode-se destacar seu caráter modular, a possibilidade de geração descentralizada de energia, a facilidade de instalação e manutenção dos sistemas, além de ser uma fonte limpa de geração de energia, tornando-se bastante adequada na eletrificação rural, em áreas normalmente de baixa e diferente intensidade de consumo e isoladas de rede elétrica. Porém, dentre os fatores negativos estão o alto custo e a baixa eficiência dos sistemas de conversão de energia, se comparados aos sistemas tradicionais de geração energética.

Visando maximizar o aproveitamento da radiação solar, proporcionando assim uma maior geração energética e conseqüente menor custo por MWh gerado, o presente trabalho de conclusão de curso consiste no projeto de um seguidor solar para uso em sistemas fotovoltaicos. Este seguidor possui dois graus de liberdade, com movimentação em relação às diferentes horas do dia (leste-oeste) e estações do ano (norte-sul), permitindo-lhe melhor aproveitamento da energia solar incidente. Esse movimento se dará (i) através de um controle eletromecânico, automático, no eixo leste-oeste e (ii) de um mecanismo puramente mecânico, manual, no eixo norte-sul.

Diversas fontes, como Mosher (1975), Neville (1976), Gordon (1991) e Kacira (2004), mostram aumento de eficiência energética variando entre 20 e 50 % em painéis fotovoltaicos com seguidores solares de um ou dois eixos, em comparação aos sistemas com plataformas fixas.

O gráfico abaixo demonstra claramente a diferença na geração de eletricidade.

Gráfico 1 - Comparação entre painel fotovoltaico seguidor solar (2 eixos) e estático.<sup>1</sup>



<sup>1</sup> Adaptado de estudo feito pela Solartrax, disponível em: <<http://www.solartrax.com/advantage-comparison.shtml>>. Acesso em 29 de março de 2006.

O trabalho é composto por um estudo sobre movimentação solar, contextualização da energia solar fotovoltaica no Brasil e no mundo e revisão bibliográfica de sistemas fotovoltaicos, que possibilitaram o dimensionamento mecânico e elaboração do controle eletrônico, viabilizando o desenvolvimento do protótipo. Painéis fotovoltaicos já em uso pelo Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (IEE - USP) foram utilizados como referência no dimensionamento do projeto.

## 2. Estudo do Sol

Sabendo-se do escopo do presente projeto, um breve estudo sobre o Sol e suas características que influenciam na radiação global é fundamental, assim como um estudo de sua geometria e movimentação, permitindo, assim, a elaboração de um controle eletrônico que seguirá esta estrela.

Segundo Rosa (2003), o Sol irradia energia a taxa média de  $3,9 \times 10^{26}$  W, com variações da ordem de  $\pm 1\%$  devido à manchas e explosões que ocorrem na fotosfera. Esta taxa se relaciona geometricamente com a intensidade de radiação que chega à Terra, sendo o fluxo de energia que chega à atmosfera variante com o inverso do quadrado da distância entre os astros. Atualmente, valores obtidos por balões meteorológicos e satélites nos trazem o valor da constante solar (Gsc) como sendo igual a  $1367 \text{ W/m}^2$ .

Um conceito importante é a definição da hora solar (HS), que é a hora baseada no movimento angular do Sol, tendo como referência a Terra e sendo meio dia correspondente ao horário no qual o Sol cruza o meridiano do observador. A hora solar corresponde ao horário habitual da Terra, porém são necessárias duas correções para obter-se a hora solar a partir desta. A primeira tem origem na diferença entre o meridiano que define o fuso horário e o meridiano do observador e a segunda se deve a perturbações na rotação da Terra. É importante lembrar que não existe horário de verão no horário solar, sendo esta calculada da seguinte forma:

$$HS = HL + 4 \cdot (L_{fuso} - L_{local}) + E$$

$$E = 9,87 \cdot \text{sen}(2 \cdot B) - 7,53 \cdot \text{cos} B - 1,5 \cdot \text{sen} B$$

$$B = \frac{360 \cdot (n - 81)}{364}$$

Sendo: HS = Hora Solar, HL = Hora Local, Lfuso = Longitude do local do fuso horário local, Llocal = Longitude do local do observador e n = dia do ano, variando entre 1 e 365 (366 em anos bissextos).

### 2.1. Geometria relacionando o Sol, a Terra e a superfície coletora

Dentre os vários movimentos da Terra, destacam-se o movimento de rotação e translação. A rotação é o movimento da Terra em torno de seu próprio eixo que dura, aproximadamente, 24 horas, ou seja, um dia. Já o movimento de translação é o que nosso planeta realiza em torno do Sol, que dura em torno de 365 dias, ou seja, um ano. O traçado do caminho que a Terra percorre ao redor do Sol é elíptico.

A Terra possui dois principais eixos imaginários que a divide em hemisférios: Norte e Sul, e Leste e Oeste, sendo representados pela linha do Equador e meridiano de Greenwich. Estes eixos determinaram a criação de dois ângulos: latitude ( $\phi$ ) e longitude ( $\lambda$ ). Uma breve definição dos outros ângulos importantes está relacionada abaixo:

#### Ângulos fundamentais relacionando a geometria Sol-Terra

- Declinação: é a medida formada pelo plano do Sol, ao meio dia, com o plano do equador, variando entre  $\pm 23,45^\circ$ .
- Zenital: é o ângulo formado entre a posição do Sol e a vertical do observador.
- Altura solar: é a medida entre o horizonte e a posição do Sol acima do horizonte.
- Horário: é o ângulo formado entre o plano meridiano passando pelo Sol e o plano meridiano do local.
- Saída solar: é medida na qual o Sol nasce ou se põe.

#### Ângulos fundamentais na superfície do coletor

- Inclinação: é o ângulo entre a horizontal do local com o plano da superfície coletora.
- Azimutal: é a medida angular tomada a partir da orientação norte do observador no plano do horizonte.
- Incidência: é o ângulo formado entre a posição do Sol relativa à superfície em questão e a normal a esta superfície.

## 3. Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica decorre da excitação dos elétrons de alguns materiais na presença de luz solar ou outras formas apropriadas de energia, sendo uma conversão direta desta luz em eletricidade.

Inicialmente, células fotovoltaicas que custavam US\$ 600 / W foram produzidas visando ao programa espacial, de acordo com CRESESB (2006). Ainda hoje, o custo é fator limitante para a geração de eletricidade a partir de células solares em escala comercial. Segundo publicação da Aneel (2005), os custos de capital atual da geração fotovoltaica varia entre 5 e 15 vezes os custos unitários de uma usina a gás natural que opere em ciclo combinado. Entretanto, nos últimos anos tem-se observado uma redução nos custos de capital de fabricação, juntamente com melhorias na eficiência de transformação de energia.

Se compararmos o custo de 1973, 600 US\$/W, com um custo atual - estimado em 6 US\$/W<sup>2</sup> -, observa-se uma redução média anual de 15,7% no custo de células fotovoltaicas, o que mostra o grande potencial econômico dessa fonte num futuro próximo. Nesse contexto, a expectativa é de crescente competitividade devido à avaliação do custo real de outras formas de geração de energia, considerando-se fatores anteriormente ignorados, como os impactos ambientais.

A figura abaixo apresenta dois gráficos. O primeiro é um estudo realizado pela Strategies Unlimited (Galdo, 2006) e demonstra a tendência do preço de painéis fotovoltaicos – note que os valores obtidos e perspectivas são muito próximos da estimativa exposta acima. O segundo mostra a evolução da eficiência de diversas células fotovoltaicas (adaptado de Miller, 2006).

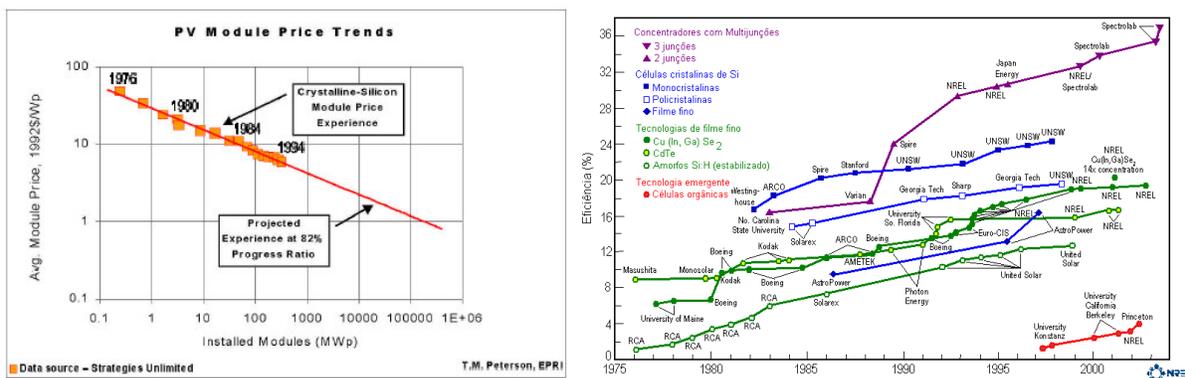


Figura 1 - Tendência do preço e eficiência de células fotovoltaicas.

Essa tendência de crescente importância no uso da energia solar fotovoltaica vem se confirmando historicamente e possui dados relevantes. A taxa de crescimento anual na produção de células tem se mantido acima de 20 % desde 1990, sendo superior a 30 %, desde 2000 (Taub, 2006 e Rogol, 2004). Esse crescimento está ainda muito relacionado a incentivos governamentais de países como o Japão e Alemanha, responsáveis por mais de 75% do potencial instalado mundial. Dados de 2006 mostram que a capacidade instalada mundial chega a 5 GW, sendo que apenas o ano de 2005 atingiu 1,7 GW, num custo total de superior a US\$ 11 bilhões. Nos Estados Unidos, o DOE (Departamento de Energia dos Estados Unidos) requisitou investimentos na ordem de US\$ 148 milhões para o desenvolvimento de energia solar fotovoltaica, visando torná-la competitiva economicamente, sem incentivos fiscais, até 2015.

### 3.2. Uso da energia fotovoltaica no Brasil

No Brasil, existem muitos projetos com aproveitamento fotovoltaico, principalmente em comunidades rurais e/ou isoladas no Norte e Nordeste. Esses projetos englobam, basicamente, quatro tipos de sistemas (Aneel, 2005): 1 - bombeamento de água, para abastecimento doméstico, irrigação ou piscicultura; 2 - iluminação pública; 3 - uso coletivo em escolas, postos de saúde e centros comunitários; e 4 - atendimento domiciliar. Além desses projetos, existem no Brasil sistemas solares conectados à rede e sistemas denominados híbridos, quais sejam, sistemas que, apesar de desconectados à rede de distribuição, atendem a demandas de médio ou grande porte, possuindo também outras formas de geração de energia - como turbinas eólicas ou geradores a óleo combustível. Esta última é uma forma muito interessante da utilização de maneira inteligente das potencialidades naturais regionais, mas possui maior grau de complexidade na otimização das diversas fontes utilizadas.

Esses projetos foram, na sua maioria, implementados com o apoio técnico e financeiro de órgãos nacionais, como o Ministério da Minas e Energia, Eletrobrás/CEPEL, e universidades, além de contar com o apoio de instituições internacionais como o NREL/DOE (Laboratório de Energia Renovável Norte-americano) e GTZ (Agência Alemã de Cooperação Técnica). Alguns programas governamentais destacam-se, como o PRODEEM, coordenado pelo MME, que implementou 8.956 projetos, com potência pico de 5.112 kW e custo total de US\$ 37.250 milhões. Atualmente se destacam o Projeto Ribeirinhas e o Projeto Luz Para Todos, ambos coordenados pela Eletrobrás, os quais visam à universalização energética do país juntamente com o aproveitamento sustentável de recursos locais para a produção de energia elétrica e desenvolvimento regional.

<sup>2</sup>Custo estimado para o ano 2000 com base em valores citados em Aneel (2005) e CRESESB (2006).

#### 4. Análise de modelos de seguidores solares

Segundo Duffie (1991), os três principais modelos para a determinação da irradiação solar incidente em painéis fotovoltaicos são o modelo do céu isotrópico, do céu anisotrópico e Perez et al. Esse último modelo, que leva em consideração os cinco termos referentes à irradiação solar (irradiação direta, isotrópica, difusa circunsolar, difusa do horizonte e refletida pelo solo) foi selecionado para análise minuciosa no presente estudo. Abaixo, confira-se a dedução do modelo, iniciando pelas variáveis de entrada:

1.  $\gamma$  = azimutal =  $180^\circ$  para o sistema fixo; ou =  $\gamma_s$  para sistema seguidor de 1 eixo; ou =  $\gamma_s$  para sistema seguidor de 2 eixos.
2.  $\beta$  = inclinação =  $23,35^\circ$  para sistema fixo; ou =  $23,35^\circ$  para sistema seguidor de 1 eixo; ou =  $\theta_z$  para sistema seguidor de dois eixos.
3. Min – minuto intermediário da hora em relação ao meio dia solar.
4. n = dia médio do mês – depende do mês.
5.  $\phi$  = latitude =  $23,25^\circ$ .
6. H = Irradiação global em plano horizontal.
7. Ho = Irradiação extraterrestre em plano horizontal.
8.  $\rho_g$  = refletância do solo.
9.  $w_s$  = ângulo de saída do Sol – depende do dia no ano.

O ângulo hora solar ( $w$ ) e ângulo declinação ( $\delta$ ) são obtidos abaixo:

$$w = \frac{\min}{4}$$

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left( 360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right)$$

O ângulo de incidência ( $\theta$ ) pode ser calculado através de:

$$a \cos(\theta) = \text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\phi) \cdot \cos(\beta) - \text{sen}(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \cos(\gamma) + \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(w) + \\ + \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(w) + \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \text{sen}(\gamma) \cdot \text{sen}(w)$$

O cálculo do ângulo zenital ( $\theta_z$ ) e a altitude solar ( $\alpha$ ) podem ser assim representado:

$$a \cos(\theta_z) = \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(w) + \text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\delta)$$

$$\alpha = 90 - \theta_z$$

O ângulo solar azimutal ( $\gamma_s$ ) é calculado da seguinte forma:

$$\gamma_s = C_1 \cdot a \cos \left( \frac{\text{sen}(\alpha) \cdot \text{sen}(\phi) - \text{sen}(\delta)}{\cos(\alpha) \cdot \cos(\phi)} \right)$$

Sendo  $C_1 = 1$  se  $w \leq 0$  ou  $C_1 = -1$  se  $w < 0$

O coeficiente  $r_t$  representa a taxa de horária em relação à irradiação diária média:

$$r_t = \frac{\pi}{24} \cdot (a + b \cdot \cos(w)) \cdot \frac{\cos(w) - \cos(w_s)}{\text{sen}(w_s) - \frac{\pi \cdot w_s}{180} \cdot \cos(w_s)}$$

Sendo os coeficientes a e b:

$$a = 0,409 + 0,5016 \cdot \text{sen}(w_s - 60)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \cdot \text{sen}(w_s - 60)$$

A obtenção da irradiação horária extraterrestre ( $I_o$ ) e global ( $I$ ) em um plano horizontal é apresentada abaixo, juntamente com o índice  $k_T$ :

$$I_o = r_i \cdot H_o$$

$$I = r_i \cdot H$$

$$k_T = \frac{I}{I_o}$$

A correlação de Erbs é:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,09k_T & \text{para } k_T \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604 k_T + 4,388k_T^2 - 16,638 k_T^3 + 12,336 k_T^4 & \text{para } 0,22 < k_T \leq 0,8 \\ 0,165 & \text{para } k_T > 0,8 \end{cases}$$

Utilizando-se essa correlação, obtém-se a irradiação difusa ( $I_d$ ) e direta ( $I_b$ ):

$$I_d = I \cdot Erbs$$

$$I_b = I \cdot (1 - Erbs)$$

O fator geométrico ( $R_b$ ) é dado por:

$$R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)}$$

Os coeficientes  $a_1$  e  $a_2$  são termos relativos ao ângulo de incidência do cone de circunsolar radiação na superfície inclinada e horizontal, respectivamente.

$$a_1 = \max[0, \cos(\theta)]$$

$$b_1 = \max[\cos 85, \cos(\theta_z)]$$

Os coeficientes de brilho circunsolar ( $F_1$ ) e em relação ao horizonte ( $F_2$ ) são funções de três parâmetros que descrevem as condições do céu: o ângulo zenital ( $\theta_z$ ), a claridade ( $\epsilon$ ) e o brilho ( $\Delta$ ).  $\epsilon$  é calculado da seguinte forma:

$$\epsilon = \frac{\frac{I_d + I_n}{I_d} + 5,535 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_z^3}{1 + 5,535 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_z^3}$$

$$I_n = \frac{I_b}{\cos(\theta_z)}$$

$$\Delta = m \cdot \frac{I_d}{I_{on}}$$

$$m = \frac{1}{\cos(\theta_z)}$$

$$I_{on} = I_{sc} \cdot \left( 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right)$$

Os coeficientes de brilho são conhecidos como  $F_1$  e  $F_2$ , sendo calculados da seguinte forma:

$$F_1 = \max\left[0, \left(f_{11} + f_{12} \cdot \Delta + \frac{\pi \cdot \theta_z}{180} \cdot f_{13}\right)\right]$$

$$F_2 = f_{21} + f_{22} \cdot \Delta + \frac{\pi \cdot \theta_z}{180} \cdot f_{23}$$

Sendo os valores de  $f$  extraídos de Duffie (1991).

Por fim, a irradiação total durante a hora analisada é:

$$I_T = I_b \cdot R_b + I_d \cdot (1 - F_1) \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right) + I_d \cdot F_1 \cdot \frac{a_1}{b_1} + I_d \cdot F_2 \cdot \text{sen}(\beta) + I_g \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right)$$

#### 4.1. Resultados obtidos com o modelo *Perez et al.*

O primeiro resultado importante é a comparação da radiação total diária nos dias médios de cada mês para o sistema fixo, seguidor com 1 eixo, seguidor com 2 eixos e do protótipo desenvolvido. Abaixo está o gráfico obtido para o mês de agosto seguido de outro gráfico contendo dados do ano inteiro:

Gráfico 2 - Comparação da irradiação durante o mês de novembro.

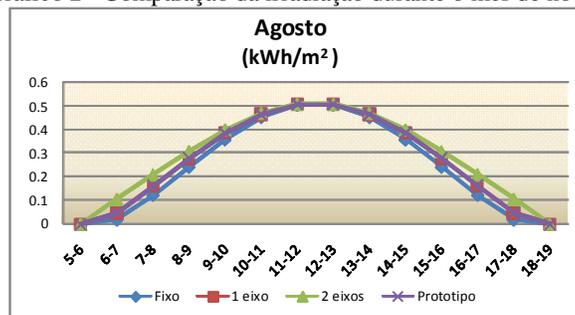
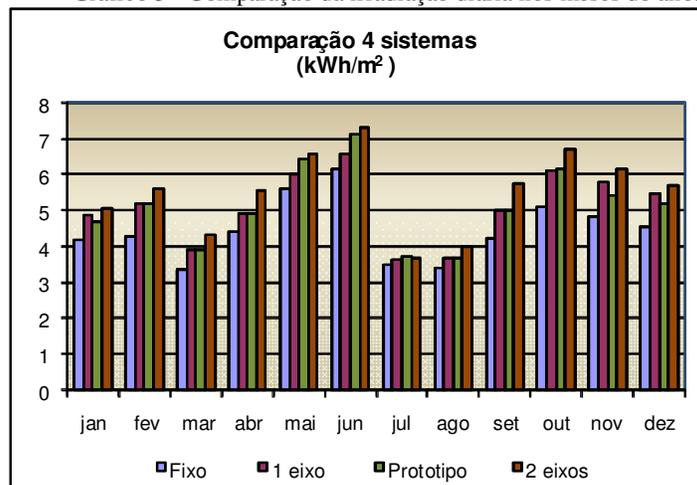


Gráfico 3 - Comparação da irradiação diária nos meses do ano.



## 5. Elaboração do protótipo

O protótipo foi criado para obtenção de dados experimentais que possibilitem a comparação com os dados obtidos numericamente através dos modelos encontrados na literatura. Os cálculos para o dimensionamento mecânico e desenhos completos estão apresentados em Faricelli (2008). Abaixo está o desenho de montagem:

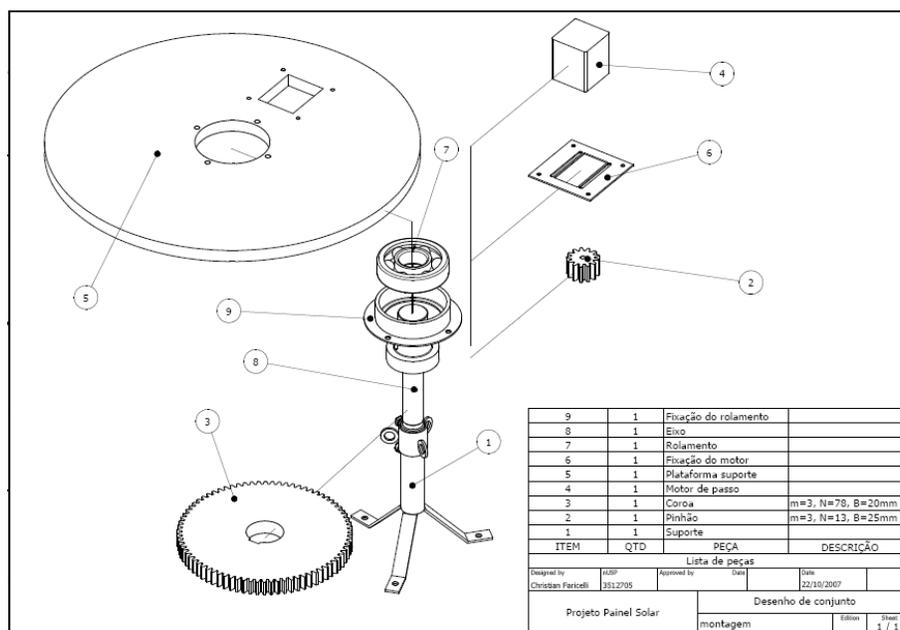


Figura 2 – Desenho de montagem.

A programação foi desenvolvida em linguagem C, utilizando-se o PICSTART PLUS no ambiente do MPLAB IDE Versão 7.60, fazendo-se uso do compilador CCSPCM C Compiler. O circuito impresso é composto por basicamente três circuitos distintos:

1. Fonte de alimentação: composta de um transformador 110/220V para 12V, diodos e um redutor de tensão 12V/5V.
2. Circuito principal: composto basicamente por um PIC16F877A-1/P, microprocessador da *Michochip*, um DS1307, relógio externo fabricado pela *Dallas Components*, três botões normalmente fechados, diodos, capacitores, cristais, resistores e mosfets. Está representado abaixo.
3. Circuito secundário: possui um PIC 16F628A e um display LCD.

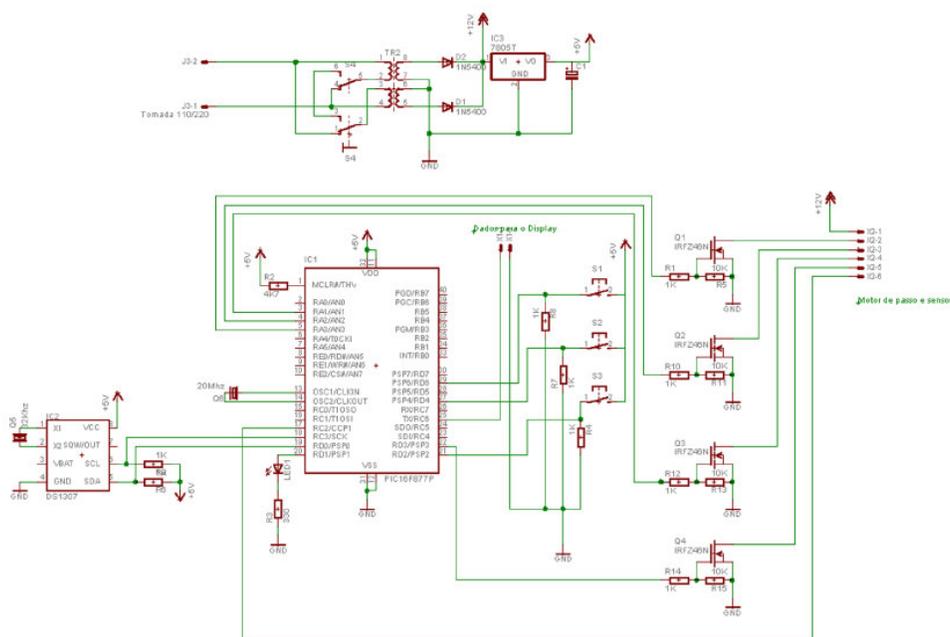


Figura 3 – Diagrama do circuito principal e fonte de alimentação.

Abaixo, fotos com detalhes do protótipo:



Figura 4 – Detalhes do protótipo.

## 6. Conclusões e recomendações

Infelizmente o protótipo ainda não foi colocado em funcionamento, pois o circuito impresso fabricado apresentou problemas, diferentemente da protoboard anterior, que funcionava perfeitamente.

Mesmo sem os dados reais, o projeto mostrou-se útil e atual, fazendo deste trabalho o início de um estudo que merece ser aprofundado.

Confiram-se a seguir recomendações para a continuidade do projeto de seguidores solares:

- Comparação por um maior período de tempo entre sistemas fixos e seguidores;
- Desenvolvimento de protótipos maiores, com 1 ou mesmo 2 eixos, diante da facilidade de extrapolar o programa aqui apresentado;
- Análise financeira do seguidor;
- Análise energética do seguidor, levando em consideração o consumo de energia.

## 7. Referências bibliográficas

- ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2ª edição. Brasília, 2005.
- Baldini, R. **Fabricação de Componentes de Sistemas FV - Mercado no Brasil : O ponto de vista da ABEER**. Apresentado no 2º SNESF - Simpósio Nacional de Energia Solar Fotovoltaica. Rio de Janeiro, 2005.
- CIA **The World Fact Book**. Central Intelligence Agency. Disponível em <<http://www.cia.gov/cia/publications/factbook/>>. Acesso dia 16 de junho de 2006.
- CRESESB. **Energia solar: princípios e aplicações**. CRESESB, Centro de referência para energia solar e eólica Sérgio de Salvo Brito, disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em 15 de abril de 2006.
- Dallas Semiconductor. **DS1307 Real-Time Clock Data Sheet**. MAXIM – Dallas Semiconductor. Disponível em <<http://www.maxim-ic.com/>>. Diversos acessos.
- Duffie, B. **Solar engineering of thermal processes**. Ed. John Wiley & Sons, Inc. 2ª Ed, EUA, 1991.
- EIA. **International energy annual 2003**. Energy Information Administration. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/emeu/iea>>. Acesso em 15 de maio de 2006.
- Evident Technologies. **Quantum dots enables new advances in solar cell industry**. Disponível em: <<http://www.evidenttech.com>>. Acesso em 20 de maio de 2006.
- Faricelli, C. **Seguidor solar para sistemas fotovoltaicos**. Trabalho de conclusão de curso, POLI-USP. São Paulo, 2008.
- Galdo, J. F. **Renewable energy technology characterizations**. Disponível em: <[http://eereweb.ee.doe.gov/ba/pdfs/pv\\_concentrators.pdf](http://eereweb.ee.doe.gov/ba/pdfs/pv_concentrators.pdf)>. Acesso em: 01 de abril de 2005.
- Gere, J. **Mecânica dos Materiais**. Ed. Thomson, 1ª Ed, São Paulo, 2003.
- Gordon, J. M.; Kreider, J. F.; Reeves, P. **Tracking and stationary flat plate solar collectors: yearly collectible energy correlations for photovoltaic applications**. Solar energy, vol. 47, pp. 245-252, 1991.
- INPE. **Distribuição espacial da radiação solar**. Disponível em: <[http://www.cptec.inpe.br/~ensinop/rad\\_sol\\_02.htm](http://www.cptec.inpe.br/~ensinop/rad_sol_02.htm)>. Acesso em 15 de maio de 2006.

- Juvinall, R.C.; Marshek, K. M. *Fundamentals of Machine Component Design*. Ed. John Wiley & Sons, Inc. 3ª Ed, Danvers, 2003.
- Kacira, M.; Simsek, M.; Babur, Y.; Demirkol, S. *Determining optimum tilt angles and orientation of photovoltaic panels in Sanlırfa, Turkey*. Renewable energy, n° 29, pp 1265-1275, 2004.
- Krauter, S.; Araújo, R.; Onneken, K.; Quaschnig, V. **Photovoltaic energy systems**. Disponível em: <<http://emsolar.ee.tu-berlin.de/lehre/english/pv1/index.html>>. Acesso em 15 de maio de 2006.
- Manfè, G.; Pozza, R.; Scarato, G. **Desenho técnico mecânico** Volume 3 Hemus-Livraria Editora Ltda. São Paulo. Microchip Technology. *PIC16F87XA Data Sheet*. Microchip Technology Incorporated. Disponível em <<http://www.microchip.com/>>. Diversos acessos.
- MME. **Balanco energético nacional – BEN 2006**. Ministério das Minas e Energia. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/site/menu/>>. Acesso dia 16 de junho de 2006.
- Mosher, D. M.; Boese, R. E.; Soukupt, R. J. *The advantages of sun tracking for planar silicon solar cells*. Solar energy, vol. 16, pp. 91-97, 1977.
- Neville, R. C. *Solar energy collector orientation and tracking mode*. Solar energy, vol, 20, pp. 7-11, 1978.
- NREL. **Best researches cell efficiencies**. National Center for Photovoltaics. Disponível em <[www.nrel.gov/ncpv/thin\\_film/docs/kaz\\_best\\_research\\_cells.ppt](http://www.nrel.gov/ncpv/thin_film/docs/kaz_best_research_cells.ppt)>. Acesso em 15 de junho de 2006.
- NSK. **Catálogo NSK de Rolamentos**. São Paulo, 2002.
- Peterson, R.E. *Stress Concentration Factors*. Ed. Longman, Inc., New York, 1972.
- Rogol, M. Tipping point: **Will Japan become the first mass market for solar power?** Decision brief, CERA (Cambridge Energy Research Associates), 2004.
- Rosa, D. J. M. **Caracterização da radiação solar: o caso da Cidade Universitária/ USP e da Ilha do Cardoso/ Cananéia**. Tese de Mestrado, PIPGE-USP. São Paulo, 2003.
- Shigley, J. E. *Elementos de Máquinas 2* McGraw Hill Hogaksha, 1ª edição. Sao Paulo, 1984.
- Shigley, J. E. *Mechanical Engineering Design* McGraw Hill Hogaksha, 3ª edição. Japão, 1977.
- Siemens. *Installation Guide for the Siemens Solar ProCharger JF Solar Electric Modules*. Siemens Solar Industries, USA, 1996.
- Stern, M.; Duran, G.; Fourer, G.; Mackamul, K.; Whalen, W.; Loo, M. V.; West, R. *Development of low-cost integrated 20 kW AC solar tracking subarray for grid connected PV power system application - final technical report*. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 1998.
- Taub, S. **Riding the wave**. Emerging generation technologies watch, CERA (Cambridge Energy Research Associates), 2005.
- Taub, S.; Walker C. S. **And now, the moment you've all been waiting for...** Emerging generation technologies watch, CERA (Cambridge Energy Research Associates), 2006.
- Yedamale, P.; Chattopadhyay, S. *Stepper Motor Microstepping with PIC18C452*. Microchip Technology Inc, 2002.
- Zampese, B. **Dimensionamento** Grêmio Politécnico, 1ª edição. São Paulo, 1986.
- Zampese, B. **Manual de elementos de construção de elementos de máquina** Grêmio Politécnico, 1ª edição. São Paulo, 1976.

## 7. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

### SUN TRACKING SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC PANELS

**Christian de Freitas Faricelli**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Poli/USP

Cfaricelli@yahoo.com.br

**Abstract.** This paper presents the development of a prototype of a sun tracking system for photovoltaic panels with two degrees of freedom, which allows movement in different times of day, through an electro-mechanical system, and the different seasons of the year, through a manual system. The project includes a literature review on sun movement, solar energy and photovoltaic panels, which together with the study of electromechanical mechanisms enabled the development of mechanical design and electronic control for the prototype. This study provides the basis of knowledge and identification of the need to be addressed, especially the social relevance of the use of photovoltaic solar energy, in the context of energy universalization, through the use of regional characteristics to provide a sustainable development. Since 1990, the photovoltaic generation grew, worldwide, with annual rates exceeding 20%. Despite these figures are still dependent on government incentives, improvements in efficiency, emerging technologies and reductions in the cost of manufacturing show a growing competitiveness in relation to conventional sources of energy generation. In Brazil, the use of photovoltaic systems is bigger in rural and / or isolated communities, mainly in the north and northeast, in projects implemented by government. The Perez et al model, used in the comparison of energy produced by fixed and tracking systems, showed a higher energy generation of around 15% of the prototype in comparison with a fixed system, significant increase in certain types of projects.

**Keywords:** sun-tracking system, electromechanical mechanism, solar energy, photovoltaic panels, solar movement.