

# **Projeto e Desenvolvimento de um Rastreador Solar para Painéis Fotovoltaicos.**

**Sandro Carneiro Ribeiro**  
**sandro.ribeiro@br.michelin.com**  
Unitau

**Pedro Paulo Leite do Prado**  
**pplprado@ieee.org**  
Unitau

**João Bosco Gonçalves**  
**joao.goncalves@unitau.com.br**  
Unitau

**Resumo:** Para tornar-se competitiva, em última análise, a energia fotovoltaica deve ter os seus custos diminuídos e utilizar sistemas fotovoltaicos de maior eficiência. As principais medidas nesse sentido são o emprego de novos materiais, o aperfeiçoamento na fabricação dos módulos e a utilização de técnicas de procura do ponto de máxima potência e de rastreamento solar. Esse artigo objetiva apresentar o projeto e desenvolvimento de um rastreador solar de azimute e elevação, baseado em uma nova concepção do sensor de posicionamento, composto de quatro fotoresistores e independente de consulta a tabela de coordenadas solares. O controle dos dois motores de corrente contínua que atuam nos eixos vertical e horizontal foi realizado por um microcontrolador PIC. As condicionantes do projeto foram baixo custo, pequeno consumo de energia e versatilidade. Pode integra-se ao sistema de busca do ponto de máxima potência e incorporar o ajuste fino através de algoritmos de “perturbação e observação” ou lógica difusa. Os testes de campo da fase inicial do protótipo evidenciaram um muito bom funcionamento do rastreador.

**Palavras Chave:** Energia - Controle - Energia fotovoltaica - Rastreador Solar - Sensor Solar

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de fontes de energia renováveis passou a ser uma real necessidade para o mundo atual, principalmente em decorrência do problema ambiental. Nesse contexto, a energia fotovoltaica destaca-se por ser uma solução cujo balanço de vantagens e desvantagens é favorável.

A energia fotovoltaica apresenta muitas vantagens, com destaque para:

- A radiação solar é uma fonte inesgotável de energia.

O Sol fornece  $1,5 \times 10^{18}$  kWh para a atmosfera terrestre, o que corresponde a 10.000 vezes o consumo mundial de energia em uma hora (LUQUE e HEGEDUS, 2011). O Brasil apresenta uma insolação considerável em seu território, conforme divulga o *Atlas Solarimétrico do Brasil* (TIBA, 2000). Utilizando apenas 0,4% da área total de terra do País, pode-se prover toda a energia demandada atualmente (CASTRO, 2010).

- O impacto ambiental é mínimo, não havendo emissão de nenhum tipo de poluente.
- Os painéis fotovoltaicos podem durar por mais de 30 anos, na superfície da Terra ou no espaço.
- Os painéis são constituídos de módulos interconectáveis e são de fácil instalação e manutenção.

No entanto, há algumas limitações enfrentar:

- O custo de instalação inicial e de produção de energia é elevado, quando comparado com o de outras fontes de energia.
- A captação da energia depende do tempo e do clima, havendo necessidade de seu armazenamento, que é dispendioso.
- A eficiência das células fotovoltaicas e dos painéis é baixa.
- A característica não linear da tensão versus corrente de saída do painel fotovoltaico (PV) dificulta a transferência da energia do PV para a carga. A tensão e a corrente variam com as condições meteorológicas e com a irradiância solar.
- A energia incidente é afetada pela orientação do painel em relação ao Sol.

Para que a energia fotovoltaica realmente se torne competitiva, tornando-se atrativa em muitas aplicações, as suas limitações devem ser solucionadas ou minimizadas.

As desvantagens decorrem, em síntese, do custo elevado devido à baixa eficiência do sistema. Assim, as principais medidas que têm sido tomadas pelos centros de pesquisa e fabricantes são:

- Aumentar a eficiência das células e painéis fotovoltaicos.

A eficiência máxima teórico das células solares de silício cristalino é aproximadamente 28%. A *Sun Power Corp.* já conseguiu uma eficiência de 24% (LEVITAN, 2012). Todavia, a eficiência dos painéis fica normalmente em torno de 16%, embora já exista tecnologia de fabricação para atingir 20%, que ainda não é aplicada para não aumentar os custos. Levita (2012) relata, porém, que o custo de 1 kg de polissílica caiu de 80 dólares (em início de 2011) para 30 dólares. Outros materiais têm sido pesquisados com sucesso e há uma real tendência de queda do preço dos painéis em função do aumento da escala de produção e das novas tecnologias de materiais e de fabricação (CRESESB, 2006).

- Maximizar a transferência da energia do PV para sua carga.

A perda de rendimento causada pela característica tensão versus corrente de saída do painel é combatida pela técnica de procura do ponto de máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*), que garante instantaneamente o casamento de impedância do painel com o conversor estático, que é geralmente a sua carga (CARVALHO, 2012). Há várias estratégias de MPPT, tais como, perturbação e observação, condutância incremental, capacitância parasita, redes neurais, lógica nebulosa, etc. (FARANDA e LEVA, 2008).

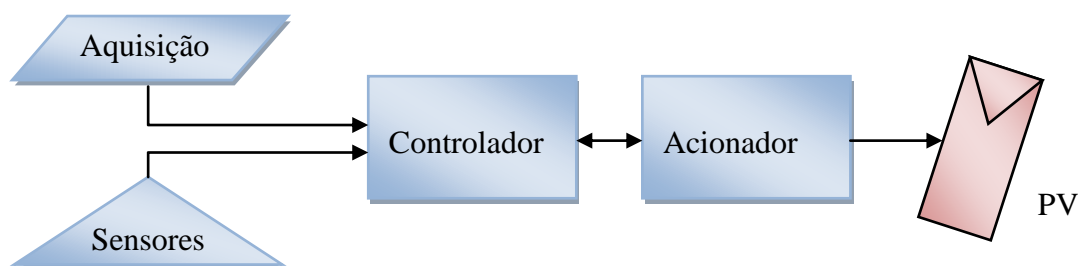
- Aumentar a captação da radiação pelo PV.

A energia captada pelo painel pode ser maximizada através de um sistema automático de rastreamento cuja finalidade é manter o plano do painel perpendicular à radiação solar incidente.

É nesse contexto de maximização contínua da entrada de energia que se enquadra este trabalho, cujo objetivo foi conceber e desenvolver um sistema de rastreamento solar para painéis fotovoltaicos. Na Seção 2 deste artigo serão resumidos os conhecimentos essenciais que embasam um sistema de rastreamento e na Seção 3 será apresentado e discutido o projeto desenvolvido.

## 2. SISTEMAS DE RASTRAMENTO SOLAR

A Figura 1 ilustra a composição básica de um sistema de rastreamento solar.



**Figura 1:** Diagrama funcional de um rastreador solar

O estágio “Aquisição” fornece os dados de latitude e longitude do sítio de instalação e as coordenadas solares e hora solar para a inicialização da orientação do painel. Em alguns tipos de rastreadores, essas informações permitem ainda o controle dos movimentos do PV.

O bloco “Sensores” fornece os sinais de controle para viabilizar um rastreamento independente das coordenadas solares e horário. Os sensores podem ser fotoresistores (LDR – *Light Dependent Resistor*), as próprias células fotovoltaicas, medidores de corrente, potência, de irradiância ou de ruído térmico.

O “Acionador” consiste nos servomecanismos, motores e seus excitadores e atuadores.

O “Controlador” é realizado atualmente com microcontroladores. Outros blocos funcionais podem agregar-se ao rastreador, tais como, relógio, temporizador, *datalogger*, interface homem/máquina (display, alarme, etc.), dependendo do seu tipo ou aplicação. Normalmente o rastreador solar integra-se ao MPPT, compartilhando recursos.

Cabe destacar que a premissa para o emprego vantajoso do sistema rastreador é que energia por ele demandada seja bem menor que o acréscimo de energia fornecida em relação a um painel fixo.



## 2.1 FUNDAMENTOS DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Os conceitos de irradiação  $R$  e irradiância  $G$  não devem ser confundidos. A irradiação  $R$  é a densidade de energia na superfície plana perpendicular à direção de propagação dos raios solares, expressa em  $\text{Wh}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ .

A irradiância é a intensidade  $B$  da radiação solar, definida pela densidade de potência incidente sobre uma superfície plana perpendicular aos raios solares com área unitária, expressa em  $\text{W}/\text{m}^2$ . O valor padrão adotado pelos fabricantes é  $B = 1.000 \text{ W}/\text{m}^2$ .

O espectro da irradiância solar  $BE$ , expresso em  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$  estende-se aproximadamente de 100 nm a 3.000 nm, abrangendo assim a faixa de ultravioleta, luz visível e infravermelho. Seu valor máximo ocorre para comprimento de onda de  $\lambda \approx 550 \text{ nm}$ , da luz verde (LUQUE e HEGEDUS, 2011).

A irradiância extraterrestre  $B_0$  é o valor medido sobre um plano perpendicular aos raios solares, colocado acima da atmosfera terrestre. Segundo a Organização Meteorológica Mundial (WMO - *World Meteorological Organization*) o valor médio de  $B_{0\text{med}}$  é  $1367 \text{ W}/\text{m}^2$ , chamado de constante solar (CRESESB, 2004).

A irradiância global  $G$  de um PV é o valor da  $B_0$  que efetivamente atinge o PV, em decorrência da atenuação causada pela massa de ar da atmosfera terrestre (LORENZO, 2011). A expressão de  $G$  é dada por:

$$G = B_{0\text{med}} \varepsilon_0 (0,7)^{AM^*} \quad (1)$$

onde:

$G$ : irradiância global de um PV [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];

$B_{0\text{med}}$ : irradiação extraterrestre ou constante solar =  $1.367 \text{ W}/\text{m}^2$ ;

$\varepsilon_0$ : fator de correção de excentricidade =  $(r_0/r)^2 = 1 + 0.033 \cos(360d_n/365)$ , sendo:

$r$ : distância do Sol à Terra [km];

$r_0$ : distância média do Sol à Terra (AU: unidade astronômica) =  $1,496 \times 10^8 \text{ km}$ .

$d_n$ : dia do ano contado a partir de 1º janeiro [inteiro];

$AM^*$ :  $(AM)^{0,678}$

$AM$ : massa de ar =  $1 / \sin(\gamma_s)$ , sendo:

$\gamma_s$ : ângulo de zênite solar [ $^\circ$ ], mostrado na Figura 3.

Além da absorção da irradiância decorrente na massa de ar, que é agravada pela existência de nuvens, chuva, poeira, neve e poluentes, ocorrem perdas adicionais causadas pela dispersão de Rayleigh e de Mie.

A característica corrente  $I_{pv}$  versus tensão  $V_{pv}$  do PV, tendo como parâmetro a irradiância  $B_0$ , ilustrada pela Figura 2, indica a proporcionalidade entre  $I_{pv}$  e  $B_0$ , o que viabiliza o rastreamento solar através de sensores ou da medida de  $I_{pv}$  (MATLAB®, 2012).

## 2.2 ÂNGULOS DO SISTEMA, COORDENADAS E TRAJETÓRIA DO SOL

A Figura 3 mostra os diversos ângulos formados entre um PV instalado no Hemisfério Sul, o raio incidente do Sol e os eixos cardeais Leste- Oeste e Norte-Sul (LORENZO, 2011).

A altitude (ou elevação) solar  $\alpha$  é ângulo entre a reta Y-P e a sua projeção Q-P no plano horizontal formado pelos eixos cardeais, no sentido horário.

O azimute solar  $a_w$  é o ângulo formado eixo Norte-Sul com a “projeção PU no plano horizontal” da reta normal ao painel, no sentido horário.

O ângulo de incidência  $i$  é formado pela normal ao plano do PV e os raios solares incidentes.

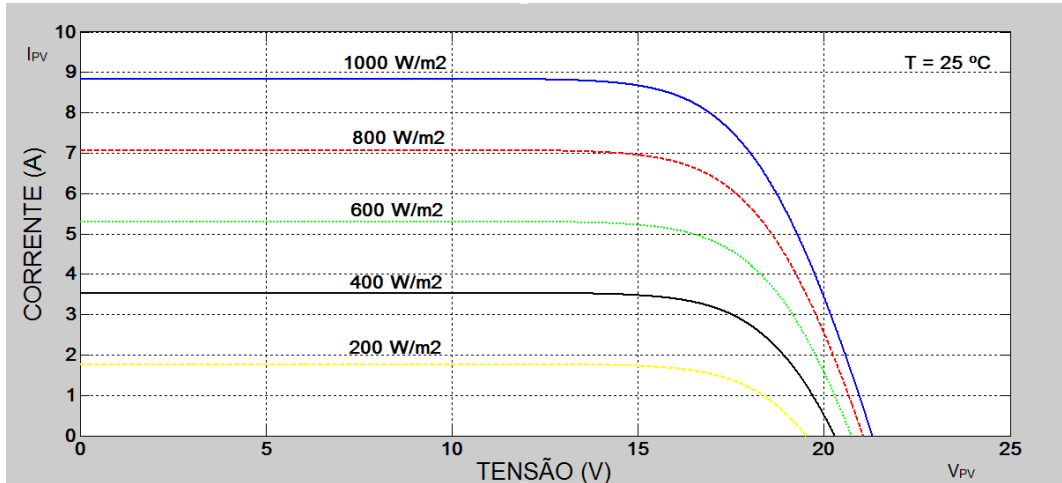


Figura 2: Característica  $I_{PV} \times V_{PV}$ , com parâmetro irradiação  $B_0$ , a 25°C (CARVALHO, 2012)

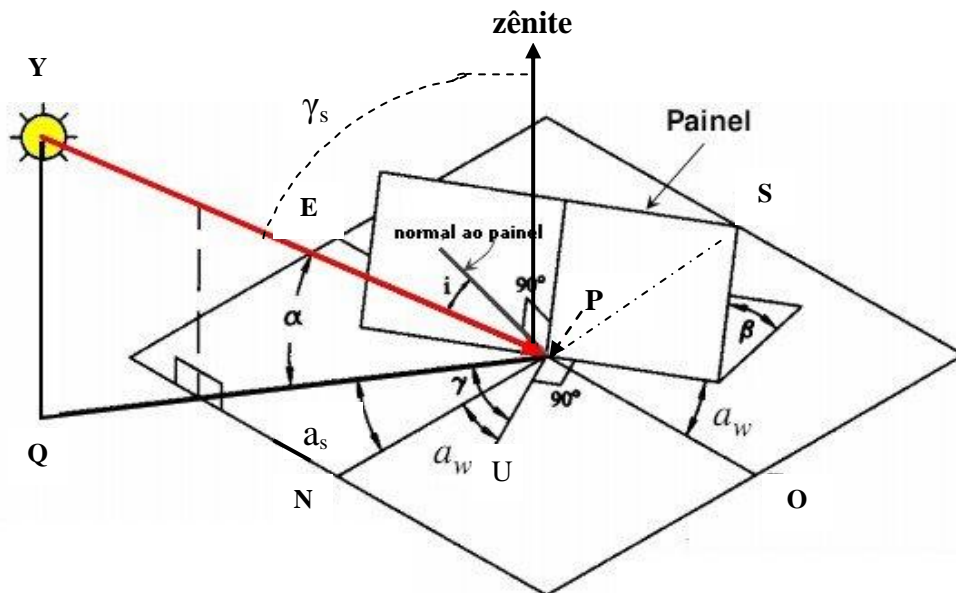


Figura 3: Ângulos entre PV, raio incidente do Sol e eixos cardeais – adaptado de (ELECTRÓNICA, 2012)

Esse trabalho enfoca a minimização da atenuação existente quando os raios de sol incidente não estão perpendiculares ao plano do painel, ou seja, quando o ângulo de incidência  $i$ , mostrado na Figura 3, não é nulo. O sistema de rastreamento controla as variáveis  $\alpha$  e  $a_w$  com o objetivo de minimizar o ângulo de incidência  $i$ , que é variável em função do movimento entre o Sol e a Terra.

A irradiação útil no painel é dada por:

$$B_u = G \cos(i) \quad (2)$$

onde:

$G$ : irradiação global de um PV [ $W/m^2$ ], dada em (1);

$i$ : ângulo de incidência [ $^\circ$ ].

Pela Figura 3 pode-se demonstrar que o ângulo de incidência  $i$  é dado por:

$$\cos(i) = \cos(\alpha) \cos(a_s - a_w) \sin(\beta) + \sin(\alpha) \cos(\beta) \quad (3)$$

onde:

$\alpha$ : altitude (ou elevação) solar [ $^\circ$ ];

$a_s$ : azimute solar [ $^{\circ}$ ];  
 $a_w$ : azimute do painel [ $^{\circ}$ ];  
 $\beta$ : ângulo de inclinação do painel em relação ao plano horizontal [ $^{\circ}$ ].

Realmente, em (3), tornando  $a_w$  igual a  $a_s$  e  $\beta$  igual a  $(90^{\circ} - \alpha)$ , resulta  $i = 0^{\circ}$ , condição em que, por (2), a irradiância é máxima.

O conhecimento da trajetória do Sol durante o dia, nas quatro estações do ano, conforme ilustra a Figura 4, permite o devido posicionamento de sensores do sistema de rastreamento, assim como dá uma indicação da melhor orientação de um PV fixo.

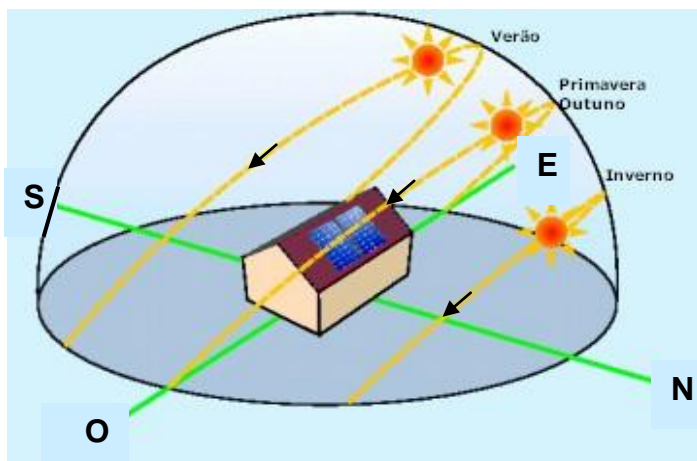


Figura 4: Trajetória do Sol no Hemisfério Norte (adaptado de ELECTRÓNICA, 2012)

### 3. PROJETO E DESENVOLVIMENTO DO RASTREADOR SOLAR

O projeto utilizou a abordagem de rastreamento baseada em sensores LDR, cujo arranjo é capaz de posicionar continuamente o PV (CATARIUS e CHRISTNER, 2010). A latitude e longitude do sítio de instalação e as coordenadas solares são utilizadas apenas para o posicionamento inicial do PV.

A Figura 5 ilustra os componentes do rastreador.

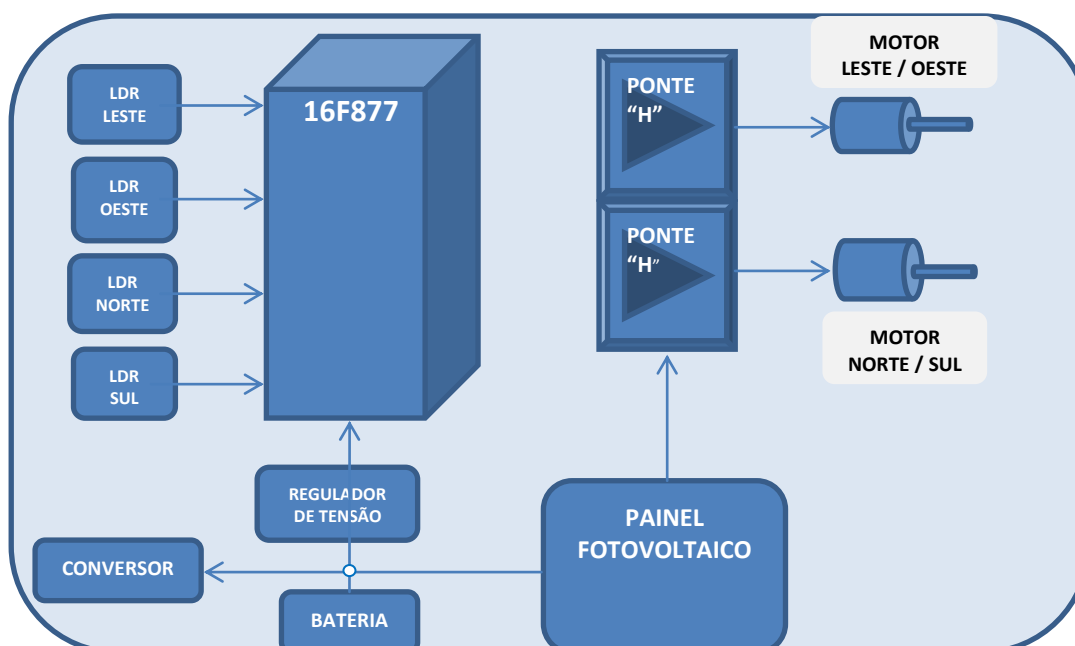
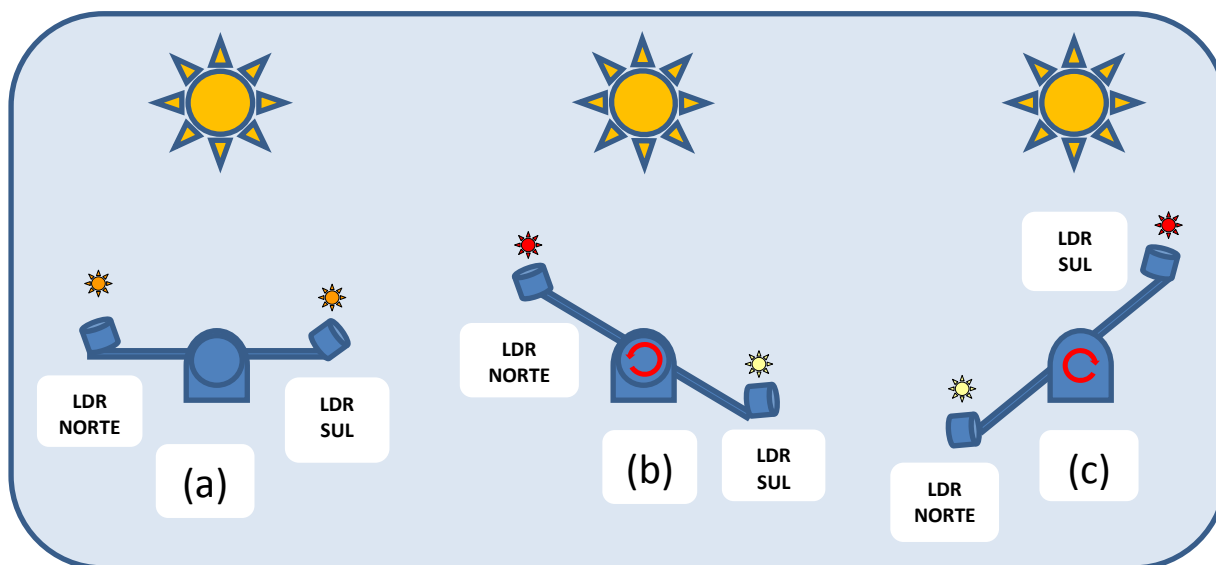


Figura 5: Componentes do rastreador solar

São dois pares de LDR, um para cada eixo cardeal. O movimento do painel em torno do eixo vertical é proporcional à diferença entre a irradiância útil recebida pelo LDR Norte e a recebida pelo LDR Sul, o mesmo acontecendo com o eixo horizontal em relação ao par de LDRs Leste e Oeste. As saídas dos pares de LDR são as variáveis utilizadas pelo microcontrolador para a realização do controle dos movimentos em torno dos eixos vertical (azimute) e horizontal (elevação). A Figura 6 ilustra o funcionamento do par de sensores Norte e Sul. Em (b) e (c) há um desequilíbrio de intensidade entre os sinais provenientes do par de LDR e em (a) o equilíbrio foi atingido por meios da rotação do eixo horizontal. Realizado o equilíbrio nos eixos horizontal e vertical, teoricamente os raios solares incidentes deverão ficar perpendiculares ao plano do PV, ou seja, o ângulo de incidência  $i$  da Figura 3 será nulo. Na prática sempre existe um pequeno erro de orientação do painel.



**Figura 6:** Componentes do rastreador solar

O controlador empregado foi o PIC 16F877, que possui 8 entradas analógicas, 33 entradas/saídas digitais e frequência de relógio máxima de 20 MHz (MICROCHIP, 2012).

A Figura 7 mostra o circuito eletrônico do rastreador.

Visto que os movimentos do Sol são lentos (cerca de  $0,24^\circ$  /min) foi utilizado um cristal de apenas 4 MHz para o oscilador. No canto superior esquerdo está o circuito oscilador (capacitores cerâmicos C1 e C2 e cristal X1), o “memory clear” MCLR, implementado com o capacitor C3 e o resistor R13, e o botão de “Reset”.

Os fotoresistores LDR 1 a LDR4 foram ligados a 4 das 8 entradas analógicas existentes. As 4 entradas não utilizadas possibilitarão o futuro aperfeiçoamento do projeto e a integração do MPPT, cujo algoritmo já foi produzido no Laboratório Verde do Centro de Exatas da Universidade de Taubaté, em fase de implantação (CARVALHO, 2012). Os resistores R1, R2, R3 e R4 realizam o “pull-down” das entradas analógicas. A sensibilidade entre a diferença de amplitudes de cada par e variação angular pode ser ajustada no terminal RA4, que permite a escolha entre dois níveis de comparação.

Nas saídas do microcontrolador, os resistores R5 a R12 limitam a corrente de base dos transistores de acionamento dos motores. Foram utilizados 4 transistores bipolares NPN (BC549) para o acionamento de cada motor. A opção de um circuito integrado excitador de motor (*motor driver*) não foi utilizada, a fim de atender a premissa de projeto de um

rastreador solar: a energia gasta no circuito deve ser significativamente menor que a energia adicional causada pelo rastreamento.

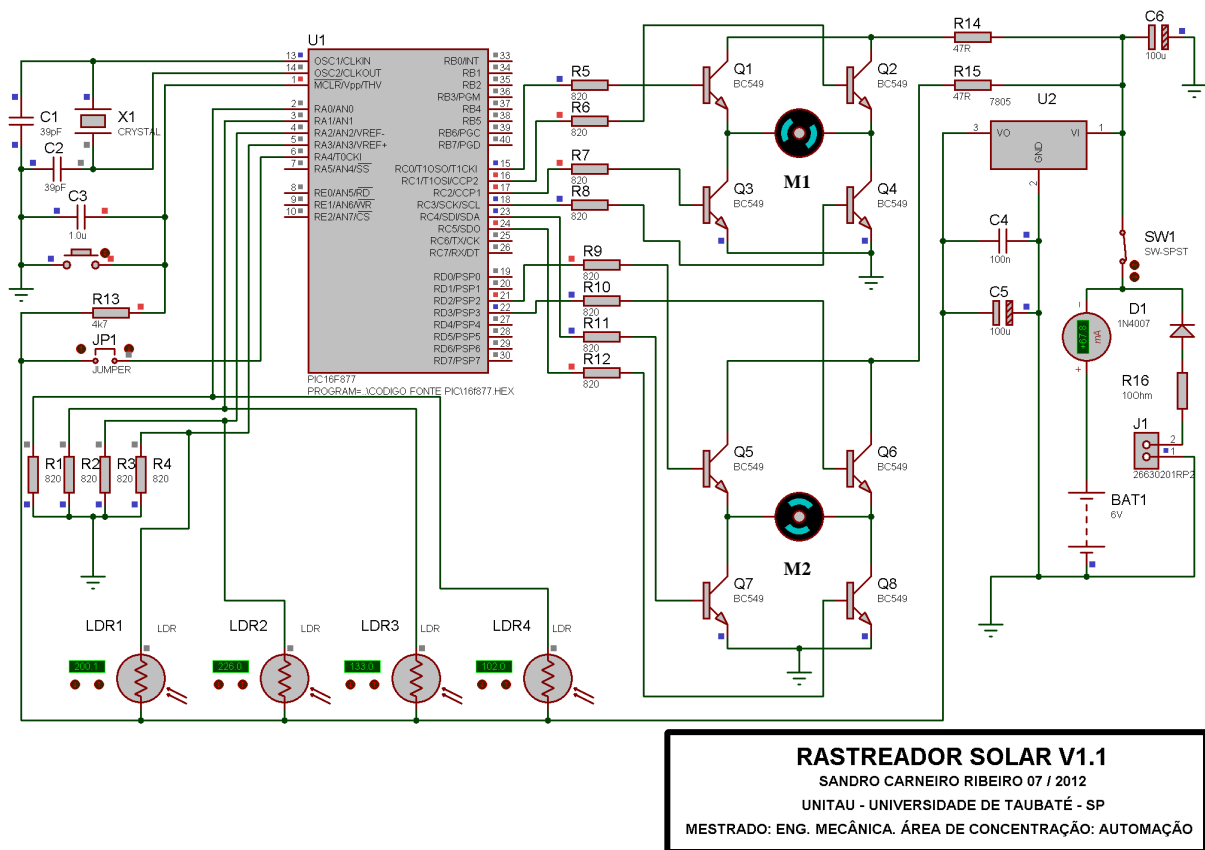


Figura 7: Circuito eletrônico do rastreador solar

Os transistores Q1 a Q4 e Q5 a Q8, de excitação dos motores M1 e M2, respectivamente, estão ligados na configuração “ponte H”, que permite a reversão de sentido de rotação desses motores. O motor M1 é acionado no sentido horário quando Q1 e Q4 estão conduzindo e, no sentido anti-horário, com a condução de Q2 e Q3. De modo similar funciona o motor M2.

O microcontrolador PIC 16F877 é alimentado por 5,0 VCC, proveniente do circuito integrado regulador de tensão.

Foi construído um inovador rastreador solar de baixo custo e pequeno consumo de energia, mostrado na Figura 8. A plataforma tem dois eixos de liberdade, com um motor vertical para rotação azimutal, alojado em uma caixa plástica, e um motor horizontal para rotação de elevação.

O motor vertical é de 6 VCC e trabalha com uma caixa de engrenagens de redução da velocidade angular para 5 rpm, a fim de fornecer um torque suficiente para a aplicação. O motor horizontal é similar ao motor vertical e sua rotação é de 3 rpm.

Os LDRs são colocados dentro de em tubos para evitar a ação de reflexões indesejáveis. A Figura 9(a) detalha a colocação dos LDRs e a Figura 9(b) é um flagrante do teste inicial de campo do rastreador, na cidade de Resende, RJ.



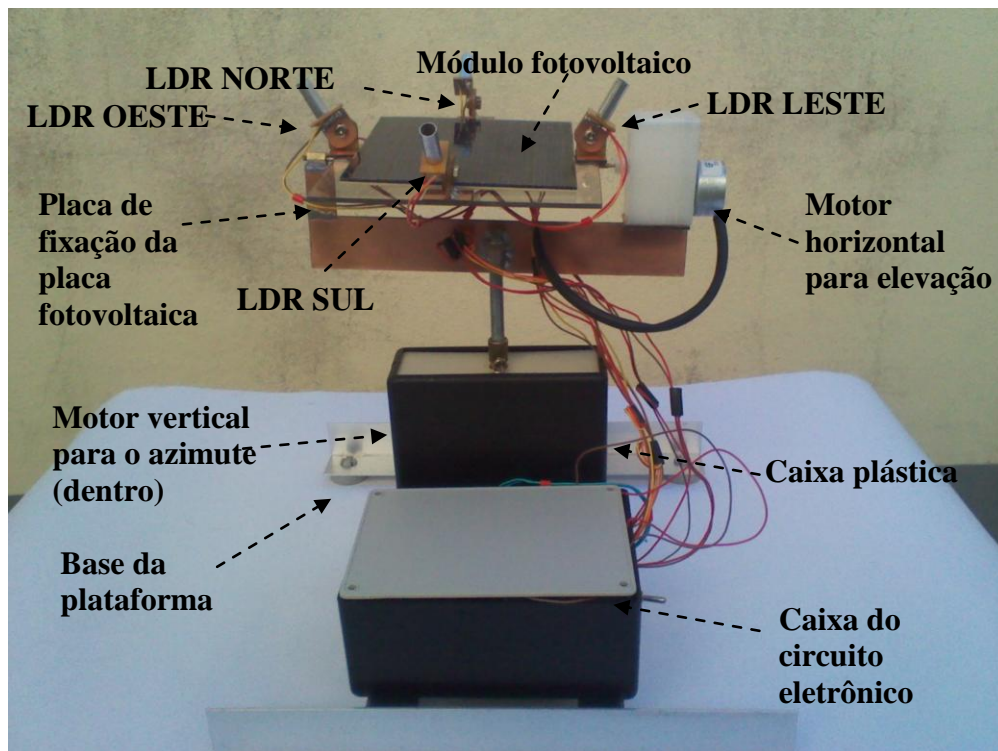


Figura 8: Protótipo da plataforma mecânica do rastreador solar



(a) Sensor de LDRs



(b) Teste de campo do rastreador

Figura 9: Sensor de LDRs do rastreador

#### 4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

O rastreador desenvolvido caracteriza-se pela simplicidade e versatilidade. Destaca-se por apresentar uma nova e simples realização do estágio de sensoriamento solar, capaz de colocar continuamente o plano do PV em uma posição perpendicular aos raios solares diretos, sem recorrer a tabela de consulta de coordenadas solares. Ainda, é suficientemente versátil, com uma pequena reprogramação, para permitir a integração com o sistema de procura do ponto de máxima potência e também para incorporar um ajuste fino de orientação, através de algoritmos de rastreamento do tipo “perturbação e observação” ou de lógica nebulosa. As principais condicionantes do projeto foram baixo custo e pequeno consumo de energia.

Os testes de campo dessa fase inicial foram realizados durante as duas primeiras semanas de julho deste ano apresentando excelentes resultados.

## **5. REFERÊNCIAS**

**CASTRO, C.** A terra do Sol. Revista Renergy Brasil. 2. ed., p. 42, 44-45, set. /out. 2010.

**CARVALHO, E.P.** Uma nova abordagem de rastreamento do ponto de máxima potência. Dissertação de Mestrado em Automação. Programa de Pós- graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, 2012.

**CATARIUS, A; CHRISTNER, M.** Azimuth-altitude axis solar tracker. Master Qualifying Project. Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts, USA.

**CRESESB** – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Energia solar- Princípios e aplicação. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial\\_solar\\_2006.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf)>. Acesso em: 28 jun. 2011.

**ELECTRÓNICA.** Instalação: Sistemas solares fotovoltaicos. Disponível em: < <http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/273/204/>>. Acesso em: 31 mar. 2012.

**FARANDA, R.; LEVA, S.** Energy comparison of MPPT techniques for PV systems. WSEAS Transactions on Power Systems, v. 3, n.1, p. 446-455, 2008.

**LEVITAN, D.** The solar efficiency gap. IEEE Spectrum, v.49, n.6 (INT), Jun 2012, p.9-10.

**LORENZO, E.** Handbook of photovoltaic science and engineering. Instituto de Energia Solar, Universidade Politécnica de Madri. Madri: Wiley, 2. ed., 2011.

**LUQUE, A.; HEGEDUS, S.** Handbook of photovoltaic science and engineering. Instituto de Energia Solar, Universidade Politécnica de Madri. Madri: Wiley, 2. ed., 2011.

**MATLAB®.** Conjunto de programas: version 6.00.88 release 12. The MathWorks, Inc: Sep.22, 2000. Copyright 1984-2000. 1 CD.

**MICROCHIP.** PIC 16F877 Datasheet Disponível em: <<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010241#1>>. Acesso em: 7 abr. 2012.

**TIBA, C.** Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres. Recife: Editora Universitária da UFPE, p. 32, 2000.