

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Felipe Camargo Trevelin

**Estudo Comparativo Entre Métodos de  
Rastreamento Solar Aplicados a Sistemas  
Fotovoltaicos**

**São Carlos**

**2014**



Felipe Camargo Trevelin

## **Estudo Comparativo Entre Métodos de Rastreamento Solar Aplicados a Sistemas Fotovoltaicos**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica.

Orientador: Prof. Edson Gesualdo

São Carlos

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

T812e

Trevelin, Felipe Camargo

Estudo comparativo entre métodos de rastreamento  
solar aplicados a sistemas fotovoltaicos / Felipe  
Camargo Trevelin; orientador Edson Gesualdo. São  
Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Energia solar. 2. Rastreamento solar. 3.  
Sistemas fotovoltaicos. 4. Painéis fotovoltaicos. I.  
Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Felipe Camargo Trevelin

Título: "Estudo comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 30/06/2014,

com NOTA 10 (dez, —), pela Comissão Julgadora:

**Prof. Assistente Edson Gesualdo - (Orientador - SEL/EESC/USP)**

**Prof. Assistente Jerson Barbosa de Vargas - (SEL/EESC/USP)**

**Mestre Rodolpho Vilela Alves Neves - (Doutorando - SEL/EESC/USP)**

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Homero Schiabel



*Este trabalho é dedicado à todos que me apoiaram, deste lado ou do outro.*



# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a minha mãe Eliani e a meu pai Antônio, por fazerem de mim tudo que eu sou e posso ser, por confiarem em mim, por me entenderem e por estarem sempre do meu lado, com tudo que eu pudesse precisar.

À minha tia Rosani, por ser minha maior professora e me ensinar tudo sobre o mundo, e que sempre que necessário me trazia de volta para esse mundo com um bom conselho e um safanão. Ao meu irmão Enrique, por ser meu melhor amigo e estar sempre do meu lado me mostrando o melhor caminho. Ao Nicolau, Lino, Sofia, Lilica, Chiquita, Félix, Bijú, Pancho e Otto por me ensinarem tanto sobre a vida sem dizer uma palavra.

Ao professor Edson Gesualdo, meu orientador, que me ajudou em todas as etapas desta longa jornada, dedicando seu tempo e esforço. À Jussara, por ter me auxiliado com todo o carinho do mundo. Ao Rui Bertho da oficina mecânica do Departamento de Elétrica, por todo o trabalho e ajuda, sem os quais este trabalho não existiria.

Aos amigos que me acompanharam durante a graduação, por tudo que foi compartilhado, diversão e trabalho, alegrias e tristezas, vitórias e derrotas. E aos professores, funcionários e todos os envolvidos na minha graduação e na conclusão deste projeto.



# Resumo

Examinando o atual panorama energético do mundo, a busca por fontes alternativas de energia se mostra cada vez mais necessária, com a sociedade tentando se enquadrar no conceito de desenvolvimento sustentável como forma de encontrar o equilíbrio com o meio ambiente ou superar futuros esgotamentos de recursos energéticos. Uma destas fontes alternativas é a energia solar ou energia fotovoltaica, que consiste na conversão da energia radiada pelo Sol em energia elétrica por meio de células fotovoltaicas, arranjadas em painéis, componentes de um sistema de geração fotovoltaica. Este trabalho tem como finalidade realizar um estudo comparativo entre os métodos de rastreamento solar, métodos estes que proporcionam o alinhamento da superfície dos painéis fotovoltaicos com o ângulo de incidência solar, acompanhando o movimento do Sol ao longo do dia ou ao longo de estações, assim aumentando o rendimento de um sistema de geração fotovoltaica. O trabalho prevê a construção de um sistema fotovoltaico em escala capaz de realizar o rastreamento solar com um ou dois eixos, ou se tornar um sistema fixo, analisando as alterações na energia gerada e consumida pelo sistema em cada uma de suas configurações.

**Palavras-chaves:** energia solar, rastreamento solar, sistemas fotovoltaicos, painéis fotovoltaicos.



# Abstract

Observing the panorama of current world energy trends, the search for alternative sources of energy is time and again more required, with society trying to fit in with the concept of sustainable development as a way to find balance with the environment or to overcome the depletion of energy resources. One of these alternative sources is solar energy or photovoltaic energy, which consists in the conversion of the energy radiated by the Sun into electrical energy by way of photovoltaic cells, arranged into panels, constituents of a photovoltaic generation system. This paper aims to carry out a comparative study of solar tracking methods, which provide alignment of the photovoltaic panels' surface with the solar incidence angle, following the Sun's movement throughout the day or through the seasons, raising the output of a photovoltaic generation system. The paper envisions the building of a scaled photovoltaic system capable of performing solar tracking using one or two axis, or becoming a fixed system, analysing changes in the energy generated and spent by the system on its different configurations.

**Key-words:** solar energy, solar tracking, photovoltaic systems, photovoltaic panels.



# Listas de ilustrações

Figura 1 – Fontes de geração de eletricidade no Brasil no ano de 2009. . . . .	24
Figura 2 – Sistema isolado ( <i>off-grid</i> ). . . . .	25
Figura 3 – Ângulos da radiação solar. . . . .	26
Figura 4 – Variação da altura solar ao longo do ano. . . . .	27
Figura 5 – Sistema de eixo único. . . . .	28
Figura 6 – Sistema de eixo duplo. . . . .	28
Figura 7 – Estrutura par de LDR. . . . .	35
Figura 8 – Esquemático do protótipo 1. . . . .	36
Figura 9 – Fluxograma do processo de posicionamento do rastreador solar. . . . .	37
Figura 10 – Estruturas móveis. . . . .	38
Figura 11 – <i>Drivers</i> de acionamento dos motores. . . . .	39
Figura 12 – Curvas da placa fotovoltaica. . . . .	40
Figura 13 – Amplificador de instrumentação. . . . .	41
Figura 14 – Protótipo completo. . . . .	43
Figura 15 – Sistema no local de testes. . . . .	43
Figura 16 – Potência entregue pelo sistema dotado de rastreador de eixo duplo. . . .	45
Figura 17 – Potência entregue pelo sistema dotado de rastreador de eixo único. . . .	46
Figura 18 – Potência entregue pelo sistema fixo. . . . .	47
Figura 19 – Comparativo de entrega de potência. . . . .	48
Figura 20 – Comparativo do nível de carga dos três sistemas. . . . .	50
Figura 21 – Esquemático do protótipo 2. . . . .	65



# **Lista de tabelas**

Tabela 1 – Medições de tensão, corrente e potência da placa fotovoltaica.	40
Tabela 2 – Parâmetros da placa fotovoltaica.	40
Tabela 3 – Relação tensão e carga da bateria utilizada.	42
Tabela 4 – Tabela parcial das medidas com o rastreador de eixo duplo.	45
Tabela 5 – Tabela parcial das medidas com o rastreador de eixo único.	46
Tabela 6 – Tabela parcial das medidas com o sistema fixo.	47
Tabela 7 – Percentual de aumento sobre a potência média.	48



# Listas de abreviaturas e siglas

PV	<i>Photovoltaic</i> (Fotovoltaico)
FV	Fotovoltaico
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (Rastreador do Ponto de Máxima Potência)
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i> (Resistor Dependente de Luz)
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Barramento Serial Universal)
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
A/D	Analógico/Digital
LiPo	<i>Lithium-Polymer</i> (Polímero de Lítio)
NiMH	Níquel-Hidreto Metálico



# Listas de símbolos

$\psi$  Letra grega minúscula Psi

$\gamma$  Letra grega minúscula Gamma

V Tensão

I Corrente



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução . . . . .</b>	<b>23</b>
1.1	Energia Solar . . . . .	23
1.1.1	Energia Solar no Brasil . . . . .	23
1.2	Sistema Fotovoltaico . . . . .	24
1.3	Posicionamento Solar . . . . .	26
1.4	Rastreamento Solar . . . . .	27
1.4.1	Sistema Fixo . . . . .	27
1.4.2	Sistema de Eixo Único . . . . .	28
1.4.3	Sistema de Eixo Duplo . . . . .	28
1.5	Objetivos . . . . .	29
<b>2</b>	<b>Revisão Bíbliográfica . . . . .</b>	<b>31</b>
2.1	Comparação Entre Sistemas Fixos e Sistemas Com Rastreamento . . . . .	31
2.2	A Discrepância na Eficiência no Aproveitamento da Energia Solar . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos . . . . .</b>	<b>35</b>
3.1	Protótipo 1 . . . . .	35
3.1.1	Teste de Rastreamento . . . . .	37
3.2	Protótipo 2 . . . . .	37
3.2.1	Estrutura Móvel . . . . .	37
3.2.2	Controlador . . . . .	38
3.2.3	Motores . . . . .	39
3.2.4	Painel Fotovoltaico . . . . .	40
3.2.5	Medições . . . . .	41
3.2.6	Bateria . . . . .	42
3.2.7	Ensaios . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Resultados . . . . .</b>	<b>45</b>
4.1	Sistema Dotado de Rastreador de Eixo Duplo . . . . .	45
4.2	Sistema Dotado de Rastreador de Eixo Único . . . . .	46
4.3	Sistema Fixo sem Rastreador . . . . .	47
4.4	Comparação Entre os Três Sistemas . . . . .	48
4.5	Consumo do Sistema . . . . .	49
4.6	Nível de Carga . . . . .	50
<b>5</b>	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>51</b>

5.1 Trabalhos Futuros . . . . .	52
<b>Referências . . . . .</b>	<b>55</b>
<b>Anexos</b>	<b>57</b>
<b>ANEXO A Código Fonte . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO B Esquemático . . . . .</b>	<b>65</b>

# 1 Introdução

## 1.1 Energia Solar

O processo de conversão de energia solar, a energia luminosa vinda da radiação solar, em energia elétrica tem o nome de efeito fotovoltaico (*foto* vindo do grego para luz e *volt* da unidade no SI para tensão elétrica). Este efeito é produzido utilizando uma pequena superfície composta de material semicondutor, chamada célula fotovoltaica, ou um arranjo de centenas destas células, denominado painel fotovoltaico.

Pode se descrever o efeito fotovoltaico que ocorre nestas células como a criação de tensão elétrica entre os terminais de uma célula, ocasionada pela excitação dos elétrons no material semicondutor desta célula devido a incidência de fótons componentes da radiação solar.

A descoberta deste efeito se dá em 1839 por Alexandre Edmond Becquerel, mas o maior desenvolvimento e aplicação do mesmo são realizados no século seguinte, com empresas do setor de telecomunicações buscando fontes de energia para equipamentos em locais remotos, e a indústria aeroespacial, fundada durante a Guerra Fria, onde veículos espaciais e satélites necessitavam de uma fonte de energia adequada para sua longa permanência no espaço. Outro catalizador para o desenvolvimento das técnicas de utilização da energia solar foi a crise energética de 1973, com o mundo todo buscando alternativas sustentáveis ao petróleo (BRAGA, 2008).

O principal material utilizado para a construção das células é o silício, e os constantes avanços na área de energia solar levaram ao barateamento desta tecnologia, porém analistas comerciais apontam para um eventual gargalo ao desenvolvimento de células mais eficientes, o que torna a busca por métodos que aproveitem melhor a incidência solar, por meio de melhor posicionamento ou rastreamento solar, bastante interessantes para a área (APPLEYARD, 2009).

### 1.1.1 Energia Solar no Brasil

O quadro de oferta de energia elétrica no país, exibido na Fig. 1 e extraído do relatório organizado por Moreira e Millikan, *O Setor Elétrico Brasileiro e a Sustentabilidade no Século 21* (2012), demonstra forte engajamento do país com fontes renováveis de energia, com mais de 75% da energia do Brasil proveniente de hidroelétricas, e uma porção considerável vinda de biomassa e metano biológico. Porém também é notável a inexpressividade das fontes eólica e solar, não atingindo nem patamares de 1%.

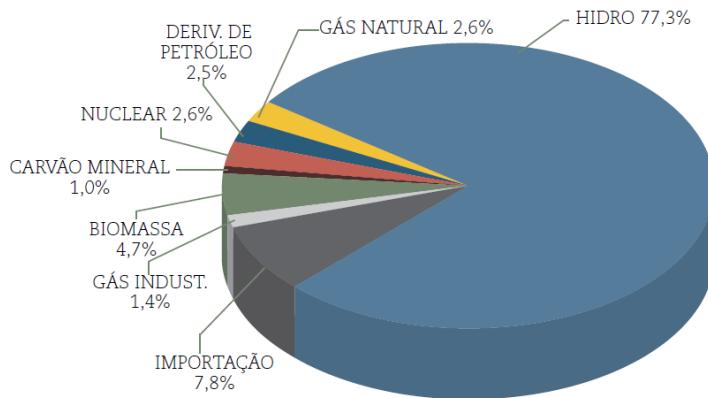


Figura 1 – Fontes de geração de eletricidade no Brasil no ano de 2009.

Fonte: MOREIRA; MILLIKAN, 2012.

O Brasil é um país privilegiado pelas reservas de quartzo para produção de silício de grau solar e pela alta incidência de raios solares em seu território. Em 2004 foi traçado um Atlas Solarimétrico do Brasil, que apontou uma média anual de radiação entre 1.642 e 2.300 kWh/m<sup>2</sup>/ano. Se fosse aproveitada a energia solar captada em menos de 3% da área urbanizada, seria possível cobrir 10% da demanda atual de energia elétrica do Brasil (MOREIRA; MILLIKAN, 2012).

Considerando equipamentos atuais e os custos vigentes da energia distribuída no país, já é possível a equiparação do custo dessa geração de energia solar com o custo que a população paga às distribuidoras de energia. Essa equiparação não ocorre tão facilmente em outros países, ela se dá no Brasil em parte pelos altos níveis de radiação solar e em parte devido ao alto custo praticado por algumas distribuidoras de energia (MOREIRA; MILLIKAN, 2012).

No entanto diante destes motivos para uma maior aplicação da geração solar, o cenário atual no Brasil ainda apresenta esta geração de energia apenas como uma alternativa utilizada em áreas mais remotas, principalmente na região Norte, onde a distribuição de eletricidade é economicamente inviável (MOREIRA; MILLIKAN, 2012).

## 1.2 Sistema Fotovoltaico

Como discutido anteriormente, um sistema fotovoltaico é um sistema capaz de gerar energia elétrica a partir da radiação solar. Estes sistemas podem ser considerados como: Sistemas Isolados (*Off-grid*), como o da Fig. 2, utilizados em locais remotos ou isolados onde não é possível a conexão à rede elétrica; ou Sistemas Conectados à rede (*Grid-tie*), onde o gerador fotovoltaico complementa a energia disponibilizada pela rede.

Um sistema fotovoltaico é composto dos seguintes componentes: painéis fotovoltaicos, controladores de carga, baterias e inversores.

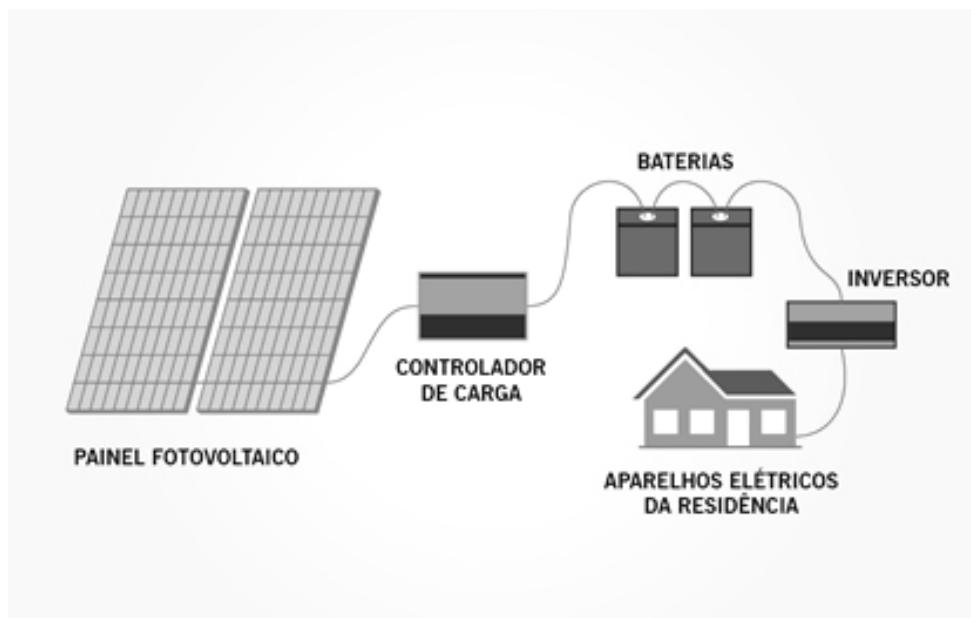


Figura 2 – Sistema isolado (*off-grid*).

Fonte: Disponível em: <<http://www.captosol.com.br/energia-fotovoltaica>>. Acesso em: jun 2014.

Os painéis fotovoltaicos, ou painéis solares, são arranjos de módulos solares, constituidos por conjuntos de células fotovoltaicas. As células ao receberem radiação solar apresentam diferença de potencial entre seus terminais, de forma que pode se considerar que estas atuam como fontes de corrente contínua, corrente essa que servirá para carregar as baterias do sistema.

Controladores de carga servem para gerenciar o processo de carga e descarga das baterias, evitando sobrecargas vindas dos painéis e descargas excessivas causadas pelos equipamentos ligados ao sistema. É comum utilizar-se técnicas, como modulação de pulsos (PWM) ou *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), para extrair o máximo dos painéis e garantir que as baterias sejam completamente carregadas.

As baterias armazenam a energia excedente produzida pelos painéis, para ser utilizada durante a noite ou em dias de baixa insolação. É comum a utilização de baterias estacionárias, mais caras que baterias automotivas, construídas com materiais diferentes e técnicas mais adequadas ao ciclo de depleção diário ao qual estarão submetidas.

Para a conversão da corrente contínua (CC) produzida nos painéis e armazenada nas baterias, em corrente alternada (CA) para alimentação de eletrodomésticos ou outros equipamentos, utilizam-se sistemas inversores. Também é papel do inversor manter a sincronia com a rede elétrica no caso de um sistema conectado à rede.

Outros componentes podem ou devem ser adicionados ao sistema, como disjuntores, fusíveis, e para-raios.

### 1.3 Posicionamento Solar

Os movimentos que o planeta Terra descreve ao redor do Sol podem ser traduzidos em dois eixos de movimentação do Sol, um conceito falso ao se tratar do sistema Solar, mas adotado para facilidade de compreensão no estudo.

O movimento de rotação da Terra é observado como o movimento do Sol no eixo leste-oeste, caracterizado pelo ângulo azimutal ( $\psi_s$ ), observado na Fig. 3. Já o movimento de translação da Terra ao redor do Sol, é adotado como a movimentação Solar no eixo norte-sul, conforme o ângulo de altitude ( $\gamma_s$ ), também descrito a Fig. 3.

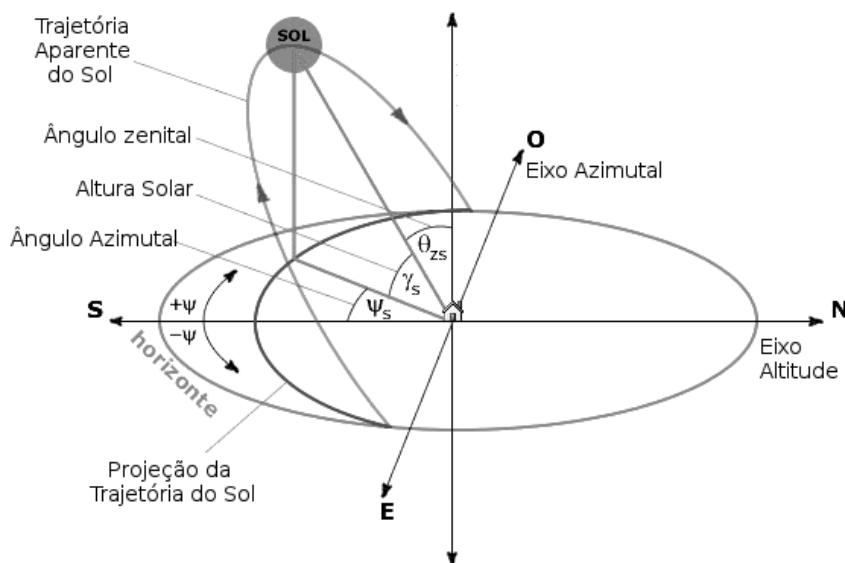


Figura 3 – Ângulos da radiação solar.

Fonte: PEREIRA, 2012.

Considerando o modelo de movimentação solar, a posição do Sol varia  $360^\circ$  no eixo azimutal (leste-oeste) diariamente, mas um observador num ponto fixo apenas observaria metade dessa transição durante um período de 12 horas, tomando em consideração o efeito do horizonte, essa variação observada cai para aproximadamente  $150^\circ$ . Já no eixo de altitude (norte-sul), o ângulo da altura solar apresenta uma variação nos seus extremos ao longo de um ano, com  $46^\circ$  de diferença entre a posição mais baixa, durante o inverno, e a posição mais alta, durante o verão. Esta diferença pode ser observada na Fig. 4.

Essa variação de ângulos causa perdas na conversão de energia de um painel fotovoltaico, o desalinhamento do mesmo com o Sol traz menor incidência do que a possível naquele horário, que se traduz em perdas para o sistema. Assim surge a necessidade de um método de rastreamento solar para mover os painéis fotovoltaicos buscando sempre a maior incidência solar.

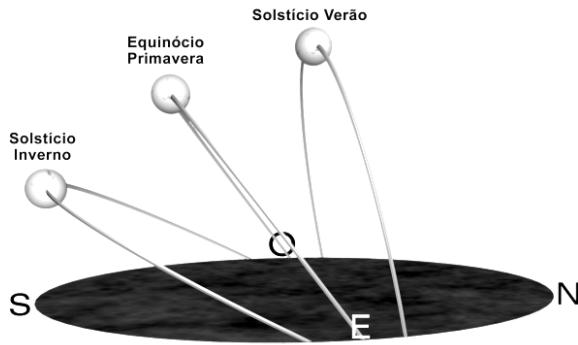


Figura 4 – Variação da altura solar ao longo do ano.

Fonte: PEREIRA, 2012.

## 1.4 Rastreamento Solar

Um sistema de rastreamento solar é o que permite a um sistema de painéis solares acompanhar o movimento do sol, aumentando assim a incidência solar captada. Por meio de motores elétricos ou algum sistema de aproveitamento da gravidade, aliados a algum método de medida da incidência solar, o sistema rotaciona os painéis até encontrar a melhor posição, e assim o faz durante o dia todo, acompanhando o movimento solar.

Estudos afirmam que o uso de um rastreador solar aumenta a entrega de energia de um sistema fotovoltaico em 15% a 35% (APPLEYARD, 2009), porém deve ser levada em consideração a presença dos motores e do sistema de medição que aumentam a carga consumida, e também outros aspectos da instalação do rastreador solar, como espaço e manutenção. A avaliação deste ganho derivado da presença do rastreador e a averiguação de suas tantas outras implicações são exatamente os objetivos da realização deste estudo.

Outro fator favorável para uso de sistemas de rastreamento é o estado da indústria de células fotovoltaicas de silício, que apresenta sinais de estagnação em seu desenvolvimento, com o preço da produção de células mais eficientes cada vez mais elevado (LEVITAN, 2012). Assim, buscam-se formas de extrair o máximo possível de painéis mais baratos, dentre as quais o uso de rastreadores pode ser destacado.

### 1.4.1 Sistema Fixo

Sistemas de painéis fotovoltaicos podem não apresentar nenhum sistema de rastreamento solar e, ainda assim, estarem posicionados com um ângulo otimizado. Numa situação padrão, a nível do mar, este ângulo seria o ponto médio da variação de ângulo do posicionamento do Sol, nos sentidos norte-sul e leste-oeste. Porém, variações na altitude, no relevo ou particularidades climáticas da região, podem alterar esse ângulo ótimo, tornando necessário um estudo da região antes da instalação dos painéis.

### 1.4.2 Sistema de Eixo Único

Rastreadores solares de eixo único, como o da Fig. 5, são construídos de forma que os painéis acompanhem apenas um eixo de movimentação do Sol, leste-oeste ou norte-sul. O uso de apenas um motor torna o sistema mais simples e de menor consumo de energia. O eixo leste-oeste é o mais utilizado por este ser o movimento de maior variação do Sol (PEREIRA, 2012), que se altera diariamente, porém em regiões mais próximas aos polos, esta variação diária se torna menor, sendo, em alguns casos, interessante a alteração do sistema para o acompanhamento do eixo norte-sul.

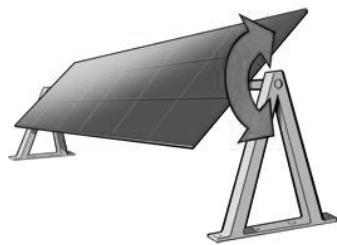


Figura 5 – Sistema de eixo único.

Fonte: Disponível em: <<http://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/>>. Acesso em: jun 2014.

### 1.4.3 Sistema de Eixo Duplo

Rastreadores de eixo duplo, exemplificados na Fig. 6, permitem que os painéis acompanhem o movimento do Sol nos dois eixos, com o aumento no consumo e na complexidade devido a um motor a mais, mas esse sistema garante que os painéis estejam apontados diretamente para o Sol a qualquer hora e em qualquer lugar que este seja instalado, aumentando o percentual de energia convertida em relação ao sistema de eixo simples.



Figura 6 – Sistema de eixo duplo.

Fonte: Disponível em: <<http://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/>>. Acesso em: jun 2014.

## 1.5 Objetivos

Dadas todas as informações relevantes, um dos objetivos deste projeto é realizar um estudo comparativo da entrega de energia de um sistema fotovoltaico instalado nas 3 condições descritas: fixo, rastreador de eixo único e rastreador de eixo duplo. Para tal será necessária a construção de um protótipo em escala reduzida capaz de realizar os testes necessários nas 3 condições distintas e assim, verificar o efeito na geração e no consumo do sistema ocasionado pela introdução de um rastreador solar a um sistema de geração fotovoltaico.

Outro objetivo é analisar a aplicabilidade destes sistemas rastreadores, analisando as vantagens numéricas de sua introdução em um sistema fotovoltaico. Para isso deve-se verificar as desvantagens trazidas pela introdução de rastreadores solares como o aumento a complexidade do sistema, o aumento no custo e o consumo adicional das cargas do sistema de rastreamento.

Cabe também ressaltar como objetivo deste trabalho, a aplicação, em um projeto real, de diversas áreas do conhecimento abordadas durante o curso de engenharia elétrica, como instrumentação, eletrônica de potência, aplicação de microcontroladores, controle e muitas outras.



## 2 Revisão Bíbliográfica

### 2.1 Comparação Entre Sistemas Fixos e Sistemas Com Rastreamento

A entrega de energia de um sistema de painéis fotovoltaicos fixo comparada ao mesmo sistema dotado de um método de rastreamento solar é alvo de uma grande quantidade de estudos no meio acadêmico. Estes estudos tomam por base um sistema fixo, com otimização angular, onde estão os painéis arranjados numa angulação calculada a receber a maior incidência solar durante o período de um ano, em sua localização determinada. Estes resultados são comparados aos resultados de um sistema de igual dimensionamento, utilizando algum método de rastreamento solar, as formas mais comuns sendo o rastreamento de eixo único e de eixo duplo.

Em um estudo realizado em Bagdá, utilizando um sistema de rastreamento de eixo único, acompanhando o sol de leste a oeste buscando maior incidência solar, Al-Najjar (2013) mostra um ganho de 29,6% em relação à sua contraparte fixa, ganho este o suficiente para cobrir o consumo de energia devido à adição do sistema de rastreamento. Outras comparações apresentaram aumento em média de 15% a 20% da entrega de energia do sistema fixo. Devido a sua posição fixa e otimizada em relação ao zenite, este sistema de 1 eixo apresenta seu melhor aproveitamento durante os solstícios de inverno ou verão.

Outro estudo, realizado por Axaopoulos e Fylladitakis (2013), idealizando um sistema de rastreamento de eixo duplo, capaz de acompanhar o movimento diário do sol leste-oeste e também o movimento em torno do zênite do painel evidenciado ao longo de um ano. Dados foram tomados na Grécia, na Alemanha e na Escócia, mostrando ganhos percentuais na geração de energia de 34,8%, 28,7% e 30,4% respectivamente. Novamente o sistema com rastreamento apresentou aumento percentual superior ao consumo adicionado ao sistema pelo mecanismo de rastreamento.

Uma observação pertinente é a expressividade destes aumentos percentuais na geração de energia, da ordem de 30%, quando se leva em consideração os gastos e a dificuldade que os fabricantes de células fotovoltaicas têm para aumentar a eficiência de suas células em valores inferiores a 1% (APPLEYARD, 2009).

Apesar das duas demonstrações apresentarem aumento na geração de energia do sistema fotovoltaico com rastreamento solar, uma série de ressalvas devem ser apresentadas, como as condições climáticas do local onde o sistema foi instalado, que podem ser observadas no estudo de Axaopoulos e Fylladitakis (2013) onde as localizações mais

afastadas do Equador apresentam resultados menores, devido a uma maior difusão da radiação solar. Também observa-se os efeitos dos dias e noites mais longos ocorrentes em localizações mais próximas aos polos.

Outra ressalva a ser feita tem caráter governamental, uma vez que os gastos e ganhos do acréscimo do rastreamento solar, podem se tornar mais ou menos vantajosos frente as características do país onde ao sistema será instalado, devido a presença de incentivos fiscais e subsídios relativos a entrega de energia do sistema, ou o efeito do preço da energia no país sobre o custo mais alto da implementação do sistema com rastreamento solar (AXAOPoulos; FYLLADITAKIS, 2013).

Além dos aspectos climáticos e governamentais, também devem ser levadas em consideração as características da própria instalação, onde um sistema com rastreamento toma um espaço consideravelmente maior que sua contraparte fixa, uma vez que há a necessidade de um espaço entre os painéis para que não haja choque ou sombra entre eles. Também deve ser considerada a vida útil do sistema, tendo os painéis fotovoltaicos atuais uma vida útil muito longa, necessitando apenas de uma eventual limpeza, e o sistema de rastreamento composto de partes móveis e motores apresentaria uma vida útil muito menor que a dos painéis necessitando de manutenção muito mais custosa (APPLEYARD, 2009).

## 2.2 A Discrepância na Eficiência no Aproveitamento da Energia Solar

Atualmente é comum os meios de comunicação noticiarem os avanços de uma empresa fabricante de células fotovoltaicas, por exemplo, em março de 2012 a empresa *SunPower Corp.* anunciou a produção limitada de uma célula capaz de atingir uma conversão de 24% da energia solar recebida. Mas essa eficiência não se traduz no mercado, onde se tem a venda de painéis solares apresentando valores de eficiência tipicamente entre 16 e 18% (LEVITAN, 2012).

Levitán (2012) aponta alguns motivos desta discrepancia: estes índices de eficiência elevados são referentes a células isoladas sob condições especiais, assim quando essas células constituírem um painel haverá perdas devido a conexão entre as células e ao efeito que uma célula apresenta sobre a próxima (temperatura, sombra); outro fator relevante é o modo de produção destas células já construídas para atingir ou bater recordes de eficiência, que é incompatível com o modo de produção em massa das células utilizadas nos painéis de mercado, apresentando várias etapas a mais para garantir a pureza de seus materiais e a perfeição em sua manufatura, o que elevaria os custos de produção a valores restritivos ao mercado.

Dessa forma os níveis de eficiência dos painéis disponíveis no mercado avançam a pequenos passos, décimos percentuais ao ano, e isto deve permanecer até que um novo processo de fabricação destas células seja descoberto ou que aconteça um barateamento na produção ou nos materiais, grande o bastante para compensar os gastos restritivos das etapas da produção das células de alto desempenho.

A existência desta discrepância entre desenvolvimento e produção em massa, dá origem a busca de meios que garantam o máximo possível de conversão de energia utilizando os painéis disponíveis em mercado. Appleyard (2009) sugere que, para as células disponíveis atualmente, o uso de sistemas de rastreamento solar é a melhor forma de aumentar a conversão de energia, salvo em situações onde a área disponível é muito grande e a simples instalação de um maior número de painéis fixo apresenta melhor relação custo benefício.



# 3 Materiais e Métodos

## 3.1 Protótipo 1

Para o estudo da introdução de um rastreador solar em um sistema de geração de energia fotovoltaica, será necessária a construção de alguns protótipos. O primeiro destes, Protótipo 1, comprehende apenas o sistema de rastreamento solar, sem sua aplicação em um sistema fotovoltaico.

Como discutido anteriormente o rastreador solar é composto de duas partes, uma responsável por um método de medição da incidência solar, geralmente são utilizados sensores de iluminação, e outra parte responsável pela movimentação destes sensores e do painel fotovoltaico, em geral motores elétricos alimentados pelo próprio gerador solar.

Para a medição de incidência solar, utilizam-se LDR, resistores dependentes de luz; elementos passivos que variam sua resistência conforme a intensidade de luz incidente sobre os mesmos. Apresentam resistência máxima na escuridão total e resistência mínima, da ordem de dezenas de ohms, sob iluminação solar direta. São sensores bastante imprecisos, impossibilitando seu uso na medição da incidência solar de fato, mas podem ser utilizados para encontrar a região de incidência solar máxima em um eixo de rotação (BARSOUM; VASANT, 2010).

Posicionando um par de LDR como na estrutura da Fig. 7, pode-se observar que com o movimento do Sol, a incidência de luz sobre o par só será igual no momento que o Sol estiver exatamente sobre a linha que divide a posição dos dois LDR. No momento desta igual incidência sobre os sensores, a resistência de ambos será igual, ou muito próxima, levando em consideração a imprecisão do componente. Bastando assim rotacionar essa estrutura com o par de LDR no eixo desejado, cada LDR compondo metade de um divisor de tensão (observar na Fig. 8), medir a tensão entre os dois LDR, quando as resistências do par se igualarem, a tensão medida será metade da tensão aplicada sobre o divisor e o ponto de maior incidência solar naquele eixo de rotação é encontrado.

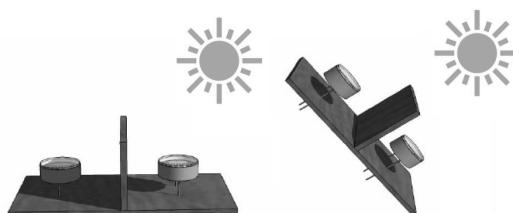


Figura 7 – Estrutura par de LDR.

Fonte: BARSOUM; VASANT, 2010.

Como o Protótipo 1 não prevê acoplamento aos painéis fotovoltaicos, a parte móvel do sistema é composta apenas do par de sensores e sua pequena estrutura, bastando assim um motor de mínimo consumo e mínimo torque para sua movimentação no eixo desejado. Assim sendo, utilizam-se servo motores de baixo custo, perfeitamente capazes de suprir as necessidades do sistema.

Para o controle do sistema e sua programação, utiliza-se um *kit* Arduino Uno R3, uma placa contendo um microcontrolador de 8 bits Atmega328. A facilidade de programação e de instalação do *kit* Arduino apresentam-se como muito vantajosas para a elaboração de protótipos, com centenas de funções básicas como leitura de conversores A/D, elaboração de PWM, comunicação *ethernet*, comunicação USB já disponíveis na biblioteca. Tais funções agilizam muito a programação de protótipos simples como o proposto. Um esquemático do Protótipo 1 pode ser observado na Fig. 8

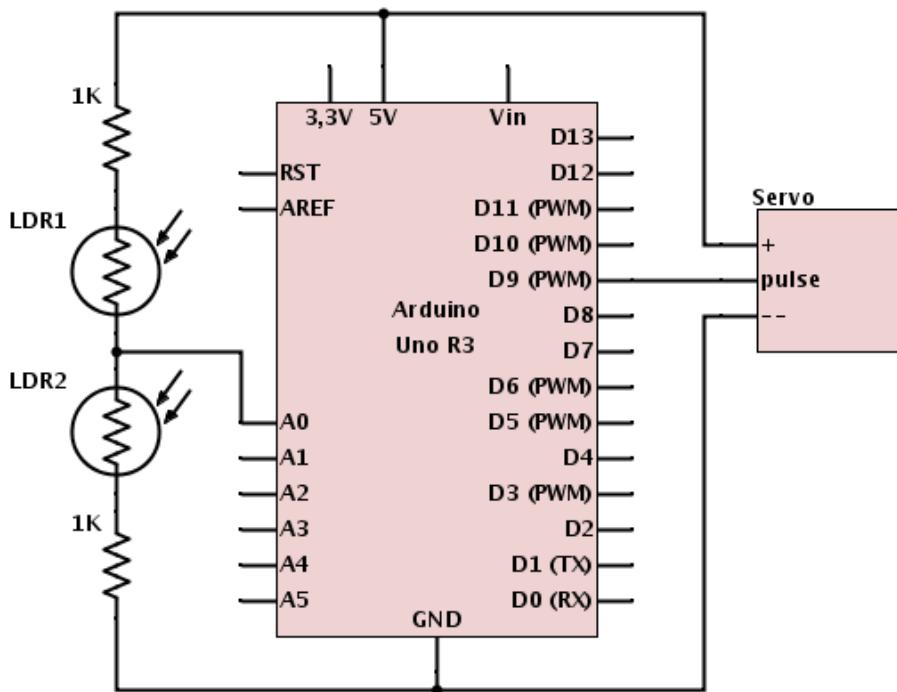


Figura 8 – Esquemático do protótipo 1.

A Fig. 9 apresenta um fluxograma do processo de posicionamento do rastreador em um eixo. A tensão medida entre o par LDR é comparada com um intervalo nas proximidades da metade da tensão utilizada no divisor de tensão. Este intervalo é utilizado como forma de compensar a imprecisão do LDR e também para calibrar o sistema para funcionamento em diferentes condições, uma vez que o comportamento do LDR na iluminação do laboratório é diferente de seu comportamento exposto a luz solar.

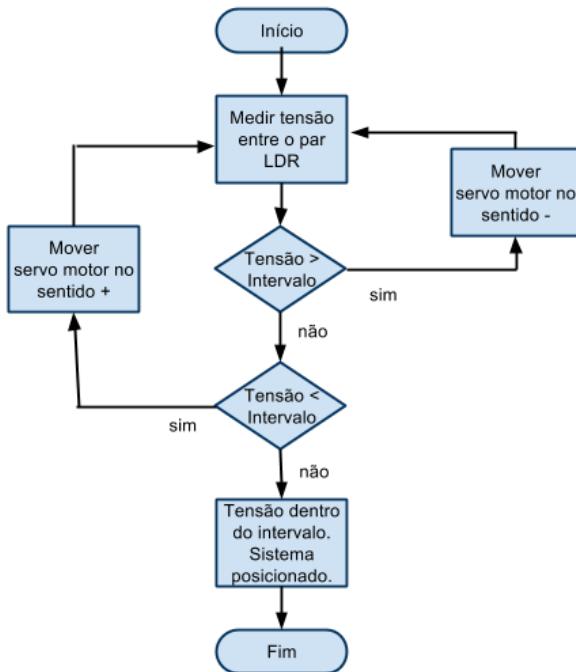


Figura 9 – Fluxograma do processo de posicionamento do rastreador solar.

### 3.1.1 Teste de Rastreamento

O teste realizado com este protótipo consiste na averiguação do funcionamento do circuito rastreador, como este se comporta em diferentes situações de incidência solar ou iluminação interna, e a realização das calibrações necessárias para compensar a imprecisão do par LDR.

## 3.2 Protótipo 2

O segundo protótipo consiste em um sistema fotovoltaico, em escala, quase completo, onde fica excluída a presença do inversor, uma vez que não há a necessidade de uma carga CA, e as medidas necessárias podem ser tomadas apenas da saída cc do painel. Este sistema é dotado de um rastreador solar de eixo duplo. É prevista a capacidade de se eliminar a mobilidade em 1 ou nos 2 eixos, afim de realizar testes comparativos entre os métodos de rastreamento.

### 3.2.1 Estrutura Móvel

O ponto de partida da construção do protótipo é a idealização da estrutura móvel, onde serão acoplados os motores que moverão o painel fotovoltaico conforme o comando do rastreador. No projeto original foi idealizada uma estrutura como a da Fig. 10 (a), capaz de se mover em 2 eixos.

Porém visando a agilidade na construção do sistema, optou-se pelo reaproveitamento de uma base fabricada para outra finalidade, mas de especificação de movimentos aproximada da necessária, exemplificada na Fig. 10 (b). A alteração deste item do projeto acarreta a substituição de vários componentes do sistema original, cada alteração será discutida em sua subseção.

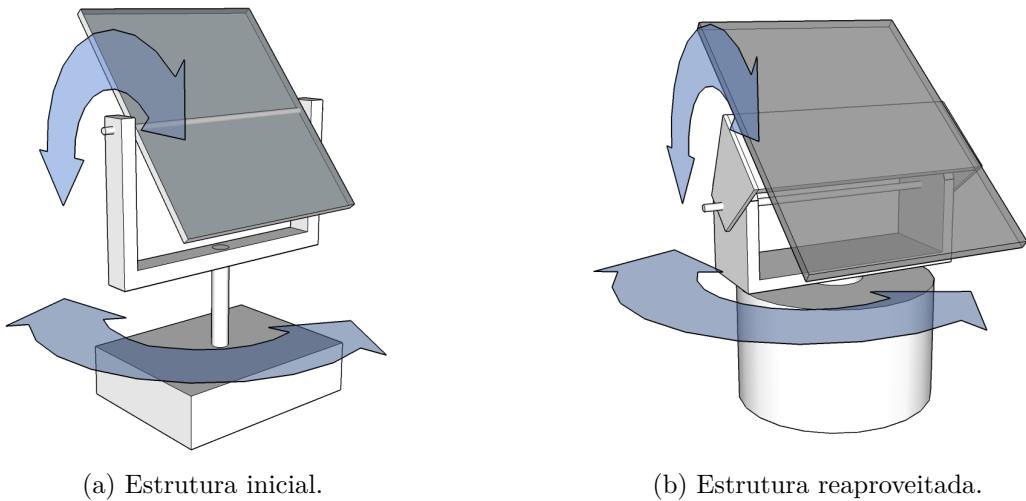


Figura 10 – Estruturas móveis.

### 3.2.2 Controlador

Neste protótipo o microcontrolador do *kit* Arduino Uno R3 realiza as funções já determinadas no protótipo anterior, em que ele controlava o movimento dos motores de forma a encontrar o ponto de máxima incidência solar, conforme a medida dos sensores LDR. Agora também é o microcontrolador que age como o controlador de carga, desligando os painéis e/ou os motores conforme o estado da bateria.

As medições necessárias para a realização do projeto serão tomadas pelo microcontrolador em intervalos programados e estes dados deverão ser enviados para análise, mas a localização remota durante o longo período dos ensaios, torna o envio destes dados mais complicada. Uma das opções para esta recepção de dados é a gravação dos dados em uma memória, o que após uma pesquisa foi descartado devido ao fato de que várias portas do Arduíno seriam inutilizadas para uso na gravação de dados e um clock e bateria adicionais seriam instalados só para suprir essa memória, aumentando o consumo energético e computacional envolvido. A opção encontrada foi a transmissão serial para um dispositivo móvel Android, preparado para receber os dados via conversão USB, que permanece junto ao sistema durante todo o período dos ensaios. Para a receptação dos dados foi utilizado o aplicativo *Android Serial Monitor Lite* que faz o papel de um monitor de comunicação serial e dá a possibilidade de gravar toda a comunicação na memória do *smartphone*.

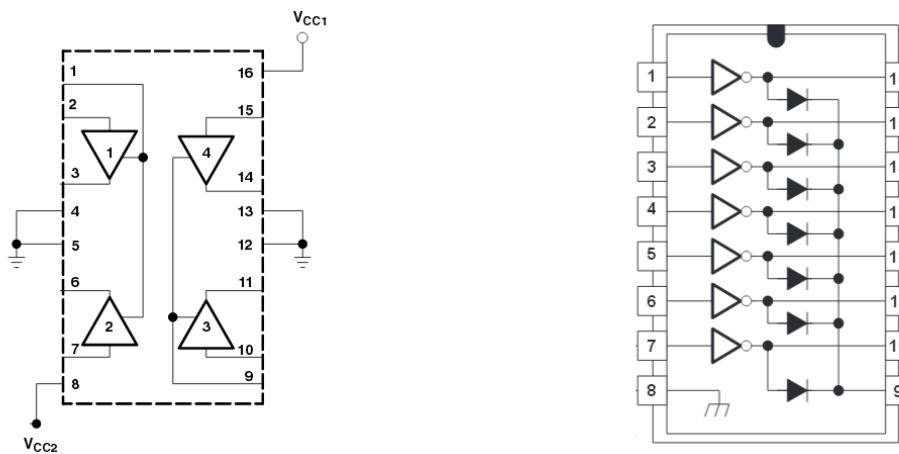
### 3.2.3 Motores

Dada a necessidade de mover um painel fotovoltaico, um par de motores mais adequados deve ser utilizado. Optou-se por motores de passo visto que o sistema de movimento por passos apresenta um melhor controle do posicionamento do painel.

Inicialmente testou-se motores de maior torque, que permitiram o deslocamento de um painel com 6 placas fotovoltaicas. Esses motores, com configuração híbrida de bobinas permitiam o uso de configuração bipolar que, em média, fornece um torque cerca de 30% maior que a configuração unipolar. Mas suas dimensões inviabilizaram o seu uso na estrutura final de fixação dos módulos, como discutido na seção 3.2.1 .

Utilizou-se então, dois motores de passo de impressora, disponíveis na oficina mecânica do Departamento de Engenharia Elétrica e que se adequavam ao espaço disponível para sua instalação. Como possuíam menor torque e estavam limitados à configuração unipolar, restringiram a aplicação ao deslocamento do painel em apenas duas placas fotovoltaicas.

Essa troca implicou também na alteração no circuito *driver*, suprimindo-se a ponte H L293D mostrada na Fig. 11 (a), utilizada no controle de um motor de passo bipolar, sendo necessária apenas a injeção de corrente nos sinais de ativação vindos do microcontrolador. Para isso são utilizados transistores Darlington, pares de transistores que proporcionam um grande ganho de corrente. Foi utilizado o CI ULN2003A, exibido na Fig. 11 (b), apresentando um arranjo de 7 transistores Darlington em seu interior, com limites de operação de 50 V de tensão e corrente de 0,5 A por canal, limites estes amplamente suficientes para a operação dos motores na tensão reduzida de 7 V e corrente 0,175 A no motor menor responsável por mover apenas o painel e 0,26 A no motor maior responsável por girar toda a estrutura.



(a) L293D - ponte h.

(b) ULN2003A - arranjo Darlington.

Figura 11 – *Drivers* de acionamento dos motores.

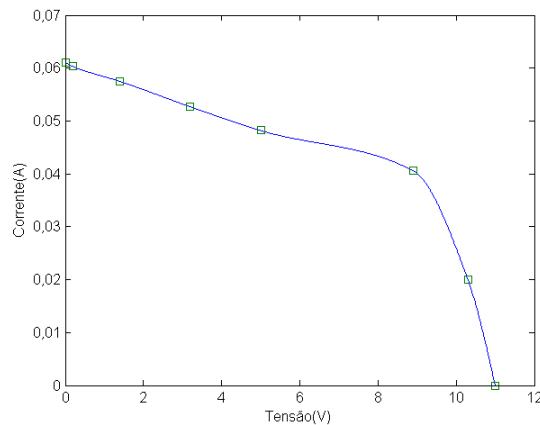
Fonte: Texas Instruments (1976, 1986)

### 3.2.4 Painel Fotovoltaico

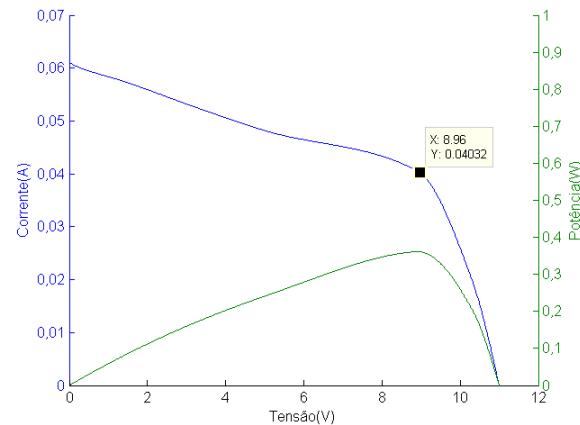
As placas fotovoltaicas fornecidas não tinham suas especificações conhecidas. Assim antes de sua utilização determinou-se a relação VI para encontrar a potência máxima da placa, parâmetro indispensável para o dimensionamento do sistema. As medidas realizadas para esta verificação podem ser encontradas na Tabela 1. A curva VI e a curva de potência máxima podem ser observadas na Fig. 12 (a) e (b) respectivamente. Os parâmetros da placa fotovoltaica obtidos através da curva VI estão relacionados na Tabela 2.

Tabela 1 – Medições de tensão, corrente e potência da placa fotovoltaica.

Resistência ( $\Omega$ )	Tensão (V)	Corrente(A)	Potência(W)
$\infty$	10,99	0	0
470	10,3	0,020	0,206
220	8,9	0,040	0,3613
100	5,0	0,048	0,241
56	3,2	0,052	0,1686
22	1,4	0,057	0,0805
3,3	0,2	0,060	0,0121
0	0,0	0,060	0



(a) Curva VI.



(b) Potência máxima.

Figura 12 – Curvas da placa fotovoltaica.

Tabela 2 – Parâmetros da placa fotovoltaica.

Potência Máxima ( $P_{max}$ )	0,36 W
Tensão Circuito Aberto ( $V_{oc}$ )	10,99 V
Corrente Curto Circuito ( $I_{sc}$ )	0,060 A
Tensão Potência Máxima ( $V_{mp}$ )	8,96 V
Corrente Potência Máxima ( $I_{mp}$ )	0,040 A
Dimensões	152 X 55 X 3 mm

O plano inicial previa a implementação de um painel utilizando 6 placas, 3 pares em série, instalados em paralelo, o que totalizaria numa tensão de 18 V e uma corrente de

120 mA, mas as alterações no projeto resultaram na impossibilidade do motor de passo em movimentar o peso das 6 placas, reduzindo assim o painel a 2 placas em paralelo, 9 V e 80 mA, o que dificultou a utilização do painel no carregamento de uma bateria. Mesmo assim as medidas necessárias para a realização do projeto foram realizadas.

### 3.2.5 Medições

Durante os ensaios o microcontrolador realiza as várias medições. A maior parte destas medidas utilizaram os conversores A/D presentes no *kit* Arduino, medidas como a tensão fornecida pelo painel fotovoltaico, o nível de carga da bateria, o estado dos sensores de par LDR, todas estas tensões, podem ser medidas diretamente, ou utilizando-se de divisores de tensão para atender ao limite de operação do conversor A/D de 5 V.

Já a corrente fornecida pelo painel deve ser tratada para que também seja medida como uma tensão pelos conversores A/D. Utilizou-se um sensor Hall, o ACS712, que fornece uma saída linearizada de uma corrente de -5 a 5 A para uma tensão de 0 a 5 V, sensibilidade de 185 mV/A, um valor razoável, mas como o painel apresenta uma corrente que não excede 100 mA, a precisão torna-se um tanto insatisfatória, apresentando baixa resolução na leitura da corrente e assim, outro método é procurado.

Optou-se então por medir a queda de tensão sobre um resistor *shunt* submetido a corrente a ser medida. Como este valor é muito pequeno, deve-se amplificá-lo. Optou-se por um amplificador de instrumentação INA118 capaz de operar com fonte única (*single-supply*), parâmetro necessário para o projeto. Projeteu-se o amplificador para um resistor shunt de 0,1 Ω, submetido a uma corrente que não excederia 100 mA, o que torna adequado um ganho de 500 V/V, para obter assim uma tensão entre 0 a 5 V proporcional à corrente. O circuito do amplificador de instrumentação segue na Fig. 13.

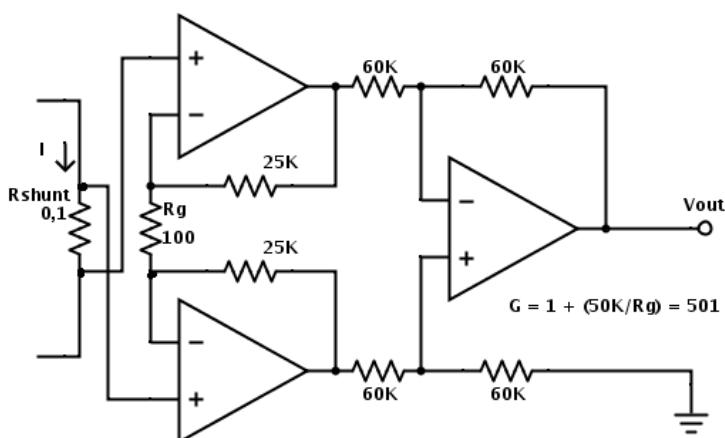


Figura 13 – Amplificador de instrumentação.

### 3.2.6 Bateria

Primeiramente pensou-se em usar uma bateria do tipo Lithium-Polymer (LiPo) de 12 V, 2000 mAh, mas a alteração no painel inviabilisou seu uso pois este não apresentou tensão o suficiente para carregá-la. Assim, optou-se por um conjunto de baterias recarregáveis de Níquel-Hidreto Metálico (NiMH), totalizando 7,2 V, com 1600 mAh, possível de ser carregada por uma tensão de 8,4 V, com uma corrente de 160 mA, valores estes compatíveis com o painel instalado.

O nível de carga dessa bateria pode ser estimado pela medida de sua tensão, esta informação é necessária para que o microcontrolador realize o controle de carga, impedindo a sobrecarga ou a descarga excessiva, desligando os painéis ou os motores conforme a bateria atinge determinados níveis de carga. Realizou-se assim um teste de depleção da bateria, onde esta bateria foi descarregada por corrente constante, realizando o acompanhamento do tempo decorrido e da tensão, para assim obter uma aproximação da relação nível de carga com a tensão da bateria.

Tabela 3 – Relação tensão e carga da bateria utilizada.

Nível de Carga	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
Tensão (V)	7,49	7,34	7,19	7,10	6,92	6,86	6,73	6,57	6,40	6,28	6,17

### 3.2.7 Ensaios

De posse do protótipo completo, que pode ser observado na Fig. 14, realizou-se os ensaios afim de se verificar o efeito da presença do rastreador solar sobre a geração de energia do sistema.

Durante um período de 10 horas, das 8h até 18h, mediu-se a tensão e corrente entregues pelo painel ao sistema e o nível de carga da bateria, em intervalos de 10 minutos, após cada medida, o sistema rastreador, quando empregado, corrige a posição do painel para a de maior incidência solar.

O ensaio foi realizado 3 vezes, em dias ensolarados e sem nuvens, temperatura média de 26 °C , com a bateria partindo sempre de 50% de sua carga total. Cada vez o sistema de rastreamento utilizado foi alterado, utilizando primeiramente 2 eixos, 1 eixo e por fim com o painel fixo, na posição que demonstrou a maior incidência por maior tempo durante os testes anteriores.

Buscou-se uma localização isolada necessária para realização destes ensaios, buscando minimizar o efeito da presença de edifícios nos arredores do local de teste. Assim os ensaios foram realizados no kartódromo de São Carlos, uma grande área plana e livre de grandes prédios em seus arredores. O sistema foi posicionado em um canteiro central

do kartódromo, fora do caminho dos usuários da área de lazer e das pistas, como pode ser visto na Fig. 15.

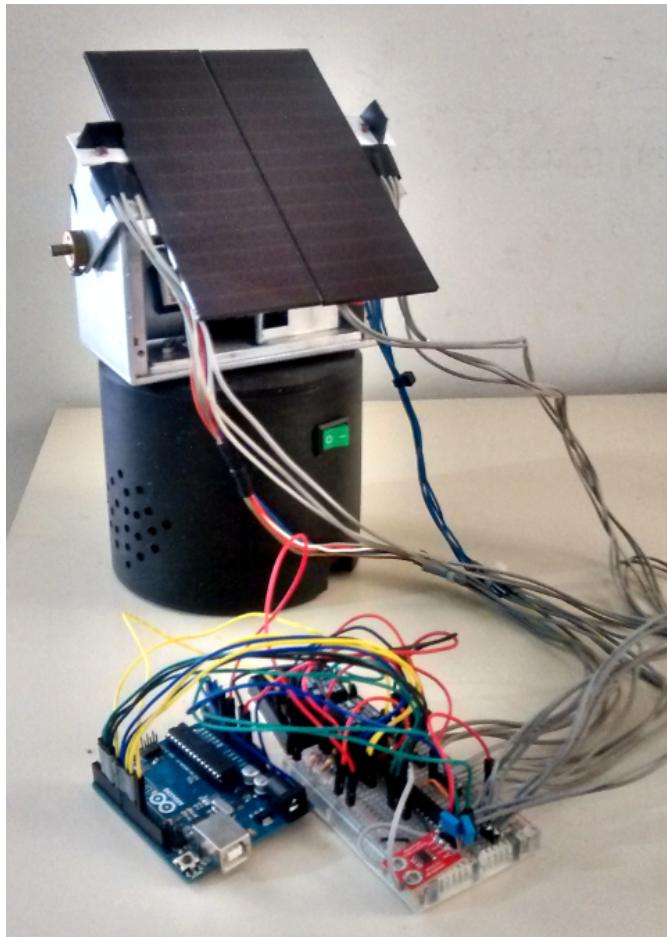


Figura 14 – Protótipo completo.



Figura 15 – Sistema no local de testes.



## 4 Resultados

### 4.1 Sistema Dotado de Rastreador de Eixo Duplo

Os testes foram realizados conforme especificado, utilizando o sistema fotovoltaico dotado de rastreamento nos dois eixos, por um período de 10 horas, em um dia ensolarado e sem nuvens, temperatura média de 26 °C , com reajuste da posição e medidas realizadas a cada 10 minutos. Segue na Tabela 4 uma versão reduzida da tabela referente a potência entregue ao sistema, com medidas a cada 1 hora, e o gráfico na Fig. 16 foi elaborado com a totalidade dos dados.

Tabela 4 – Tabela parcial das medidas com o rastreador de eixo duplo.

Horário	Tensão (V)	Corrente(A)	Potência(W)
08:00	8,590	0,054	0,465
09:00	8,591	0,061	0,530
10:00	8,700	0,064	0,559
11:00	8,889	0,074	0,659
12:00	9,014	0,075	0,679
13:00	9,002	0,079	0,718
14:00	8,911	0,079	0,707
15:00	8,794	0,076	0,669
16:00	8,691	0,065	0,565
17:00	8,504	0,060	0,516
18:00	8,600	0,037	0,325

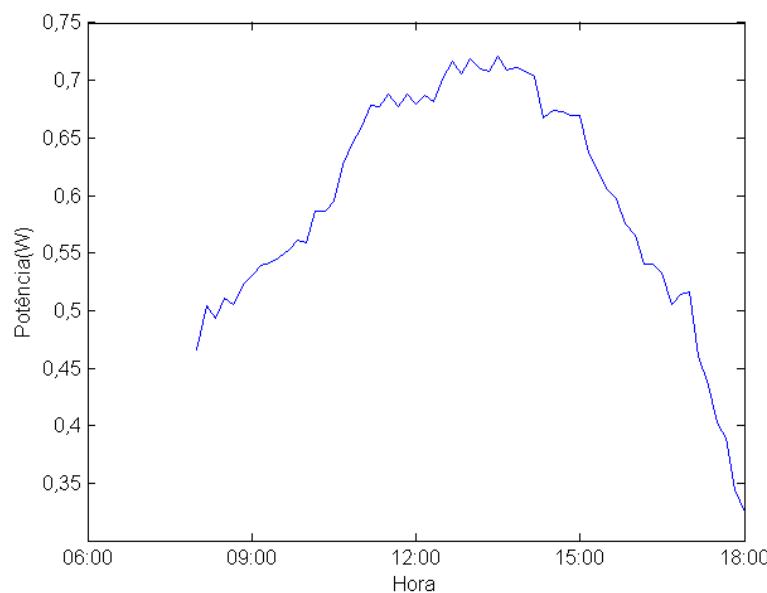


Figura 16 – Potência entregue pelo sistema dotado de rastreador de eixo duplo.

## 4.2 Sistema Dotado de Rastreador de Eixo Único

Repete-se o mesmo teste, em outro dia de características climáticas aproximadas do teste realizado com o sistema de eixo duplo. Desta vez o motor responsável anteriormente pelo movimento leste-oeste é desligado e o eixo de movimentação deste é fixado na posição mais favorável dada a altura do Sol durante a época dos testes (final do outono). O outro motor passa a ser responsável também pelo movimento diário leste-oeste e permanece reajustando a posição do painel a cada 10 minutos e as medidas são tomadas nestes mesmos intervalos. A Tabela 5 apresenta um resumo dos dados obtidos e a Fig. 17 apresenta o gráfico referente a totalidade dos dados.

Tabela 5 – Tabela parcial das medidas com o rastreador de eixo único.

Horário	Tensão (V)	Corrente(A)	Potência(W)
08:00	8,183	0,029	0,242
09:00	8,400	0,035	0,296
10:00	8,395	0,050	0,424
11:00	8,616	0,063	0,544
12:00	8,700	0,073	0,642
13:00	8,895	0,075	0,670
14:00	8,585	0,071	0,617
15:00	8,616	0,064	0,559
16:00	8,401	0,054	0,460
17:00	8,185	0,047	0,388
18:00	8,199	0,040	0,334

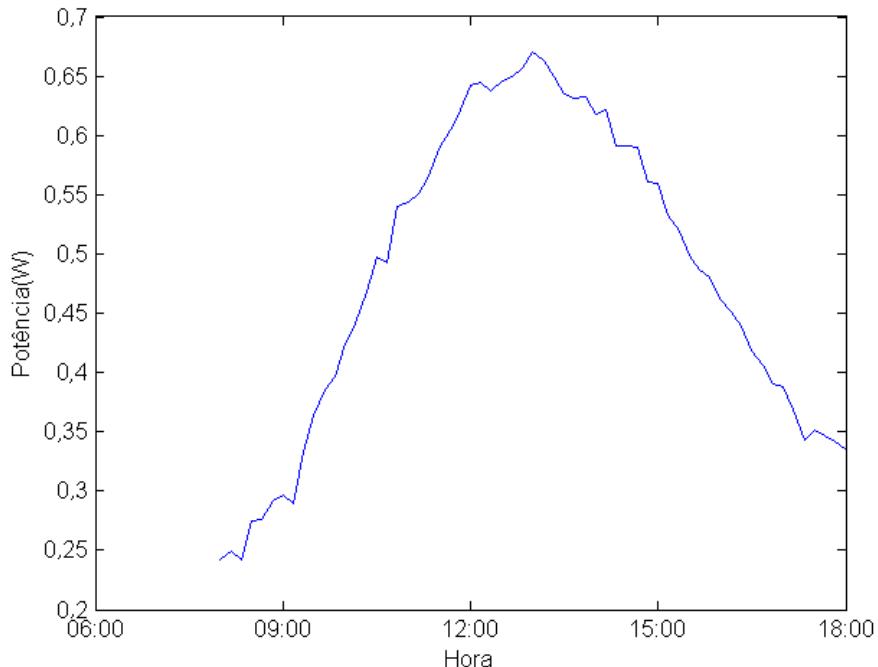


Figura 17 – Potência entregue pelo sistema dotado de rastreador de eixo único.

### 4.3 Sistema Fixo sem Rastreador

Mais uma vez o teste é repetido em outro dia de condições climáticas favoráveis, mas desta vez o sistema fotovoltaico não possui nenhum mecanismo de rastreamento, estando o painel fixado na posição de maior incidência solar observada nos outros testes. A Tabela 6 apresenta um resumo dos dados obtidos e a Fig. 18 apresenta o gráfico referente a totalidade do dados.

Tabela 6 – Tabela parcial das medidas com o sistema fixo.

Horário	Tensão (V)	Corrente(A)	Potência(W)
08:00	7,895	0,020	0,160
09:00	8,208	0,025	0,211
10:00	8,401	0,037	0,310
11:00	8,587	0,044	0,383
12:00	8,644	0,061	0,535
13:00	8,754	0,079	0,691
14:00	8,594	0,058	0,498
15:00	8,480	0,043	0,369
16:00	8,298	0,036	0,300
17:00	8,193	0,028	0,231
18:00	8,001	0,016	0,129

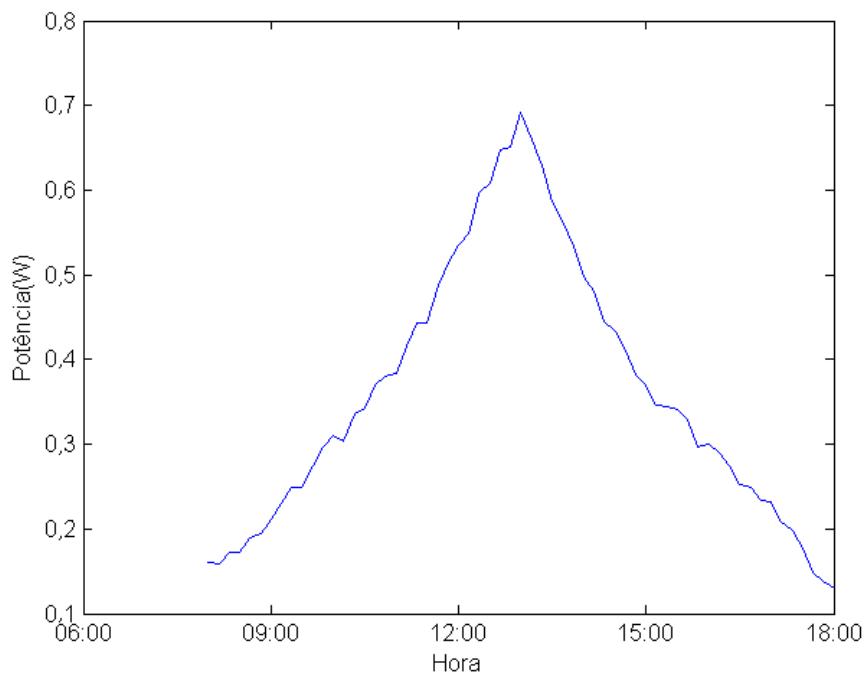


Figura 18 – Potência entregue pelo sistema fixo.

## 4.4 Comparação Entre os Três Sistemas

O desempenho de cada sistema foram comparados sobrepondo os gráficos da potência entregue pelo painel fotovoltaico em cada sistema, resultando no gráfico da Fig. 19. Observa-se como a presença do rastreador solar extende o período de máxima incidência solar sobre o painel, o que no gráfico pode ser observado como apenas um pico na potência entregue pelo sistema fixo, este torna-se um patamar quando o sistema utiliza um rastreador, que é prolongado conforme o sistema de rastreamento utilizado é mais capaz em seu alinhamento com o Sol.

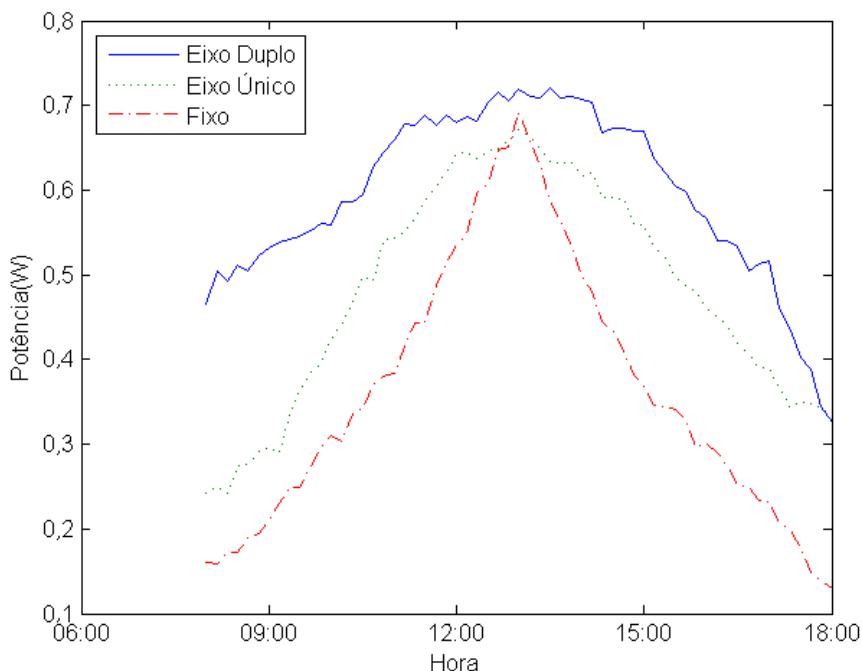


Figura 19 – Comparativo de entrega de potência.

Também é válida a análise do valor da potência média fornecida por estes sistemas, valores de 0,59 W, 0,48 W e 0,36 W, respectivamente referentes ao sistema dotado de rastreador de eixo duplo, eixo único e sistema fixo. O ganho percentual da potência de um sistema em comparação ao outro é apresentado na Tabela 7, calculados conforme a fórmula:

$$\frac{Potência_A - Potência_B}{Potência_B} * 100 \quad (4.1)$$

Tabela 7 – Percentual de aumento sobre a potência média.

	Eixo Único	Fixo
Eixo Duplo	18,8%	39,2%
Eixo Único	—	25%

## 4.5 Consumo do Sistema

O sistema foi programado de forma a consumir o mínimo de energia possível, funcionando em intervalos de 10 minutos entre cada ciclo de medidas e reposicionamento do painel. Durante estes intervalos o Arduino é configurado para dormir e a alimentação dos *drivers* dos motores é cortada impedindo consumo desnecessário de energia. Dessa forma, durante as 10 horas de realização de cada teste, o sistema permanece ativo apenas por uma média de 5 minutos nos sistemas onde há o reposicionamento do painel e uma média de 2 minutos para o sistema fixo.

O motor de dimensões menores, instalado com o eixo paralelo ao solo e responsável por levantar o painel, realiza um esforço superior quando este deve erguer o painel de sua posição mais baixa, o que aumenta a corrente consumida por este motor para 225 mA, assim a estimativa de consumo deste motor durante os testes em que este foi utilizado é de 0,12 Wh.

O motor de dimensões maiores, responsável por movimentar toda a estrutura, atua sempre nas mesmas condições, puxando uma corrente de 260 mA, totalizando um consumo de 0,14 Wh.

O Arduino e os sistemas conectados a este consumiram uma corrente de 150 mA durante os momentos de pleno funcionamento, e 3 mA nos momentos em que este é colocado em modo *sleep*.

Assim o consumo estimado dos sistemas de rastreamento de eixo duplo, eixo único e fixo são de, respectivamente, 0,53 Wh, 0,41 Wh e 0,23 Wh. Partindo de um sistema fotovoltaico fixo, a introdução de um rastreador de eixo único ou duplo neste sistema trará um aumento tanto na geração (observado na seção 4.4), como no consumo, como visto acima; a relação entre estes dois parâmetros permite observar como os rastreadores solares compensam seu próprio consumo dentro do rendimento adicional entregue ao sistema. Esta relação é calculada conforme a fórmula:

$$\frac{Consumo_A - Consumo_B}{Geração_A - Geração_B} * 100 \quad (4.2)$$

Observa-se que introduzindo um rastreador de eixo duplo ao sistema fixo, a carga adicional consome o equivalente a 13% da potência adicional entregue; entre um sistema de eixo único e um sistema fixo essa equivalência é de 14%; entre o sistema de eixo duplo e o sistema de eixo único é de 10%.

## 4.6 Nível de Carga

No gráfico da Fig. 20 observa-se a evolução do nível de carga da bateria utilizada no sistema. Todos os testes realizados iniciaram com uma bateria com aproximadamente 50% de sua carga completa. Os três sistemas apresentaram o comportamento esperado, com a maior parte da carga acumulada durante o ápice de incidência solar em torno do meio dia. Pode se observar uma rampa presente no resultado dos três sistemas, e esta se torna mais constante conforme o sistema se torna mais complexo. Um comportamento esperado, uma vez que uso de um rastreador solar estende o período de incidência máxima sobre o painel.

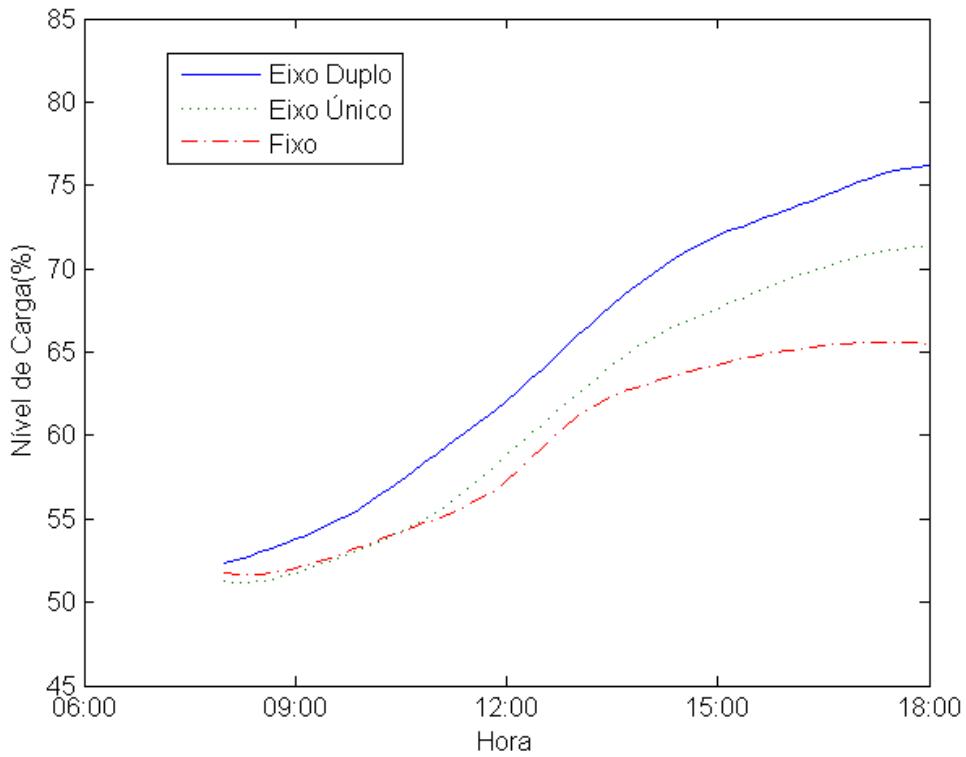


Figura 20 – Comparativo do nível de carga dos três sistemas.

## 5 Conclusão

A análise dos resultados dos ensaios, realizada na seção 4.4, permite observar a diferença trazida pela introdução do rastreador solar ao sistema fotovoltaico. A potência entregue ao sistema utilizando o rastreador de dois eixos é 18% e 39% maior que a dos sistemas dotados de rastreamento em apenas um eixo e do sistema fixo, respectivamente. O sistema com rastreador de apenas um eixo apresentou resultado 25% maior que o sistema fixado em uma posição otimizada. Valores estes dentro do esperado conforme outros trabalhos acadêmicos e informações comerciais (AL-NAJJAR, 2013; AXAOPoulos; FYLLADITAKIS, 2013; SOLAR..., ).

O consumo extra trazido ao sistema pela utilização dos motores e do microcontrolador, como visto na seção 4.5, mostrou-se muito pequeno, uma vez que os motores permanecem ligados e o microcontrolador em estado acordado em média por 5 minutos durante cada período de 10 horas dos testes realizados. Demonstrou-se que o consumo adicional trazido ao sistema pela introdução do sistema rastreador é inferior a 15% da potência adicional trazida ao sistema pelo mesmo sistema de rastreamento.

Quanto a medida da recarga da bateria proporcionada pelo painel fotovoltaico, observada na seção 4.6, as alterações no projeto trouxeram complicações, a configuração final do painel se apresentava no limite da tensão útil para a recarga das baterias e a corrente máxima fornecida pelo painel era apenas a metade do valor esperado para um carregamento eficaz da bateria. Mas ainda assim os testes apresentaram resultados satisfatórios.

Concluindo toda a análise comparativa observa-se que a aplicação de rastreadores solares em sistemas de geração fotovoltaica é sempre vantajosa de um ponto de vista energético, o rendimento adicional extraído dos painéis é bastante expressivo e o consumo adicional do rastreador pode ser minimizado de forma a se anular dentro do rendimento proporcionado pelo rastreador. Assim a decisão de não se utilizar destes recursos baseia-se exclusivamente em termos financeiros, como custos adicionais de instalação e manutenção, em termos estruturais como a adequação da área de instalação ou em condições climáticas regionais.

Outro conceito interessante a se observar é a escalabilidade do uso de rastreadores solares para sistemas fotovoltaicos de maior porte. Para esta análise é necessário o estudo de outro sistema fotovoltaico de tamanho diferente ao utilizado. Com este intuito estimaram-se as características do sistema inicialmente idealizado para o estudo, que portava 6 placas fotovoltaicas (potência máxima do painel instalado de 2,1 W, tensão fornecida e corrente fornecida de 18 V e 120 mA) e motores diferentes (maior torque,

operantes com uma tensão de 12 V e corrente de 300 mA). Analisando o sistema com rastreador de eixo duplo, visando o mesmo ganho no rendimento de 39%, comparou-se as características do consumo dos sistemas de tamanhos diferentes, verificou-se que para cada 1 W de potência do painel instalado, o consumo do sistema rastreador de eixo duplo aumenta 0,24 Wh em um dia de funcionamento. O mesmo conceito de escalabilidade pode ser verificado para o preço do sistema. Estimando o preço de ambos os sistemas de rastreamento de eixo duplo, adequando para motores disponíveis no mercado de parâmetros próximos. Assim, obteve-se uma nova relação onde para cada 1 W de potência máxima do painel instalado, o preço do rastreador aumenta em R\$3,07 . Estes fatores de escala obtidos para o consumo e preço de sistemas maiores, foram tomados utilizando sistemas de características muito próximas e assim não há garantia do comportamento linear desta estimativa quando o sistema aumentar muito em seu tamanho, principalmente no fator do preço onde os valores não crescem de forma linear e sim conforme a oferta de mercado. Cabe a um trabalho futuro realizar o projeto de um rastreador solar adequado a um sistema fotovoltaico de grande porte, para averiguar a precisão destas estimativas de escalamento.

A conclusão do trabalho permitiu a observação de aspectos da realidade na execução de um projeto, a consideração de vários parâmetros, a dificuldade de manter as tarefas dentro de um prazo, o efeito de influências externas e alterações imprevistas, aspectos próprios do ambiente de trabalho ao qual o engenheiro está submetido.

O trabalho também cumpriu seu objetivo de aplicar numa situação real uma vasta gama de conhecimentos adquiridos ao longo do curso de engenharia elétrica, utilizando conceitos como programação de microcontroladores, uso de transdutores, construção de circuitos eletrônicos, dimensionamento de projetos, e também aprofundando em áreas mais específicas como o uso da energia fotovoltaica. Outra experiência adquirida foi a capacidade de redigir um trabalho textual seguindo normas especificadas por um orgão competente, essa experiência pode parecer elementar mas é indispensável para o profissional no meio de trabalho.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Uma possível evolução do trabalho realizado é a análise da geração de energia do sistema durante o período de um ano, verificando o efeito das estações sobre os diferentes rastreadores, como a alteração da altura relativa do Sol afeta o sistema, observar as diferenças na incidência solar nos diferentes meses e obter uma análise mais realista da aplicabilidade do uso de rastreadores dadas as condições locais.

Esta análise também torna possível a verificação do efeito da temperatura sobre os sistemas fotovoltaicos. Sabe-se que a temperatura está relacionada com a tensão fornecida

pelo painel, mas seu efeito não pode ser observado nos testes realizados pois os dias dos testes não apresentaram amplitude térmica grande o bastante para uma alteração significativa. Com os testes realizados durante o ano todo, certamente o efeito da amplitude térmica poderá ser investigado.

Um fator que também merece uma futura averiguação é o efeito do intervalo entre correções de posicionamento utilizado. Verificou-se que fator está diretamente relacionado ao consumo e a geração do sistema, logo existe a necessidade de uma análise da duração ótima para este intervalo onde ocorra o mínimo de consumo para o máximo de geração de energia.

Outro possível avanço no trabalho está na aplicação de um rastreador solar em um sistema fotovoltaico de tamanho real, com painéis da ordem de centenas de watts, atentando as dificuldades maiores de instalação e manutenção que acarretam do uso de motores e partes móveis mais robustas. Utilizando componentes disponíveis comercialmente também é possível fazer uma análise da relação custo benefício trazida pela adição de um rastreador solar ao sistema, observando as possibilidades de instalação em diferentes áreas como residencial, agrícola e industrial.



## Referências

- AL-NAJJAR, H. M. T. Experimental evaluation of the performance of one-axis daily tracking and fixed pv module in Baghdad, Iraq. *Iraq Academic Scientific Journals - Journal of Engineering*, v. 19, n. 9, 2013.
- APPLEYARD, D. *Solar Trackers: Facing the Sun*. 2009. Disponível em: <<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/06/solar-trackers-facing-the-sun>>. Acesso em: jun 2014.
- AXAOPoulos, P. J.; FYLLADITAKIS, E. D. Energy and economic comparative study of a tracking vs. a fixed photovoltaic system. *European Scientific Journal*, v. 9, n. 12, 2013.
- BARSOUM, N.; VASANT, P. Simplified solar tracking prototype. *Global Journal on Technology & Optimization*, v. 1, 2010.
- BRAGA, R. P. *Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações*. Dissertação (Graduação) — Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ - Brasil, 2008.
- CAPTOSOL - Engenharia Solar e Alternativa LTDA. Disponível em: <<http://www.captosol.com.br/energia-fotovoltaica>>. Acesso em: jun 2014.
- LEVITAN, D. *The Solar Efficiency Gap*. 2012. Disponível em: <<http://spectrum.ieee.org/green-tech/solar/the-solar-efficiency-gap>>. Acesso em: jun 2014.
- MOREIRA, P. F.; MILLIKAN, B. (Ed.). *O Setor Elétrico Brasileiro e a Sustentabilidade no Século 21: Oportunidades e Desafios*. 2. ed. Brasília: International Rivers Network - Brasil, 2012.
- PEREIRA, F. *Guia de Manutenção de Instalações Fotovoltaicas*. 1. ed. Anduriña: Publindústria Edições Técnicas, 2012.
- SOLAR Choice. Disponível em: <<http://www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/>>. Acesso em: jun 2014.
- Texas Instruments. *Datasheet: ULN2002A, ULN2003A, ULN2003AI, ULN2004A, ULQ2003A, ULQ2004A*. 1976.
- Texas Instruments. *Datasheet: L293, L293D Quadruple Half-H Drivers*. 1986.



## Anexos



# ANEXO A – Código Fonte

```

#include <Stepper.h> // Biblioteca de funções para controle
                    // de motores de passo
#include <LowPower.h> // Biblioteca que facilita as operações
                     //dos modos de baixo consumo do Arduino

Stepper motorz(240, 3,4,5,6); // Declara o motor do eixo z (motor maior)
Stepper motory(240, 8,9,10,11); // Declara o motor do eixo y (motor menor)
int tempo=0;
int flagy=0; //flags utilizadas na verificação da estabilidade
              // da posição solar
int flagz=0; //se ambos os sensores permanecem sem alteração por 10 ciclos o
              //sistema entra em um intervalo
float bateria=0.0;

void setup() {

    Serial.begin(9600); //inicia comunicação serial
    motorz.setSpeed(10); //define velocidade dos motores
    motory.setSpeed(10);
    pinMode(7, OUTPUT); //define como saída os pinos que controlam os relés
    pinMode(12, OUTPUT);

}

void loop() {

    if ((flagz>10)&&(flagy>10)) { // verifica se ambos os sensores estão
                                //a mais de 10 ciclos dentro do limiar
        flagz=0;
        flagy=0;

        digitalWrite(12, HIGH); // Desliga a alimentação dos drivers
        delay(250);
}

```

```
espera10min(); // Chama o intervalo de 10 minutos
delay(250);
Serial.print("Hora: "); // Envia por transmissão serial para o Android
Serial.println(tempo); // O tempo atual
Serial.print("Tensão: ");
Serial.println(tensaoPV(),4); // A tensão fornecida pelo painel
Serial.print("Corrente: ");
Serial.println(correntePV(),4); // A corrente fornecida pelo painel
bateria=tensaobateria();
Serial.print("Nível Bateria: ");
Serial.println(bateria,4); // A tensão da bateria
delay(250);

if (bateria>7.34){ //verifica se a bateria está acima de 90%
    Serial.print("Bateria Ultrapassou 90% - Painel Desligado");
    digitalWrite(7, HIGH); // Desliga o painel PV
    delay(250);
    espera1hora() //Aguarda 1 hora com os painéis desligados para que
                  //haja consumo ou o operador desligue
    delay(250);
    digitalWrite(7, LOW);
}
if(bateria<6.28){ //verifica se a bateria está abaixo de 10%
    Serial.print("Bateria Menor 10%");
    delay(250);
    espera1hora()//Aguarda 1 hora na posição atual para que haja
                  //algum carregamento ou o operador desligue
    delay(250);
}

digitalWrite(12, LOW);} // Liga a alimentação dos drivers dos motores

int sensorz = analogRead(A0);//Le o sinal dos sensores
int sensory = analogRead(A1);

if (sensory < 509){ //se o sinal do sensor é menor que o limiar definido
    motory.step(-1); //passo para um lado
    flagy=0;}
else if (sensory > 515){ //sinal maior que limiar
```

```
    motory.step(1); //passo para outro lado
    flagy=0;}
else { //sinal dentro do limiar
    flagy=flagy+1;} // não movimenta, e contabiliza para o intervalo
delay(150);

if (sensorz < 507){
    motorz.step(1);
    flagz=0;}
else if (sensorz > 513){
    motorz.step(-1);
    flagz=0;}
else {
    flagz=flagz+1;}
delay(150);

}

void espera10min(){ // loop de chamadas do modo sleep, utilizando o
                    //watchdog timer interno
for(int i = 0; i <75; i++)
{
    LowPower.powerDown(SLEEP_8S, ADC_OFF, BOD_OFF);
                    // comando que inicia o modo sleep,
                    // com maior timer interno disponível
}
tempo+=10 //adiciona 10 minutos ao contador enviado pela serial
}

void espera1hora(){ //loop da função anterior, duração de 1 hora,
                    //utilizado nos momentos críticos da bateria
for(int i = 0; i <6; i++)
{
    espera10min();
}
}

float correntePV(){ //função para medida da corrente do painel PV
float medida=0.0;
```

```
float valor=0.0;

for(int i = 0; i <1000; i++)
{
    medida += (analogRead(A3))/1000.0;
}

valor = (medida/513024)*50; //compensando o conversor A/D e
                           //amplificador de instrumentação
return valor;
}

float tensaoPV(){ //função para medida da tensão do painel PV
    float medida=0.0;
    float valor=0.0;

    for(int i = 0; i <1000; i++)
    {
        medida += (analogRead(A2))/1000.0;
    }

    valor = (medida/341.0)*5.0; //compensando conversor A/D
                               // e divisor de tensão
    return valor;
}

float tensaobateria(){ //função para medida da tensão da bateria
    float medida=0.0;
    float valor=0.0;

    digitalWrite(7, HIGH); // Desliga o painel PV, para medida da bateria
    delay(250);
    for(int i = 0; i <1000; i++)
    {
        medida += (analogRead(A2))/1000.0;
    }
    delay(250);
    digitalWrite(7, LOW); // Religa o painel PV
```

```
    valor = (medida/341.0)*5.0; //compensando conversor A/D  
                                // e divisor de tensão  
    return valor;  
}
```



## ANEXO B – Esquemático

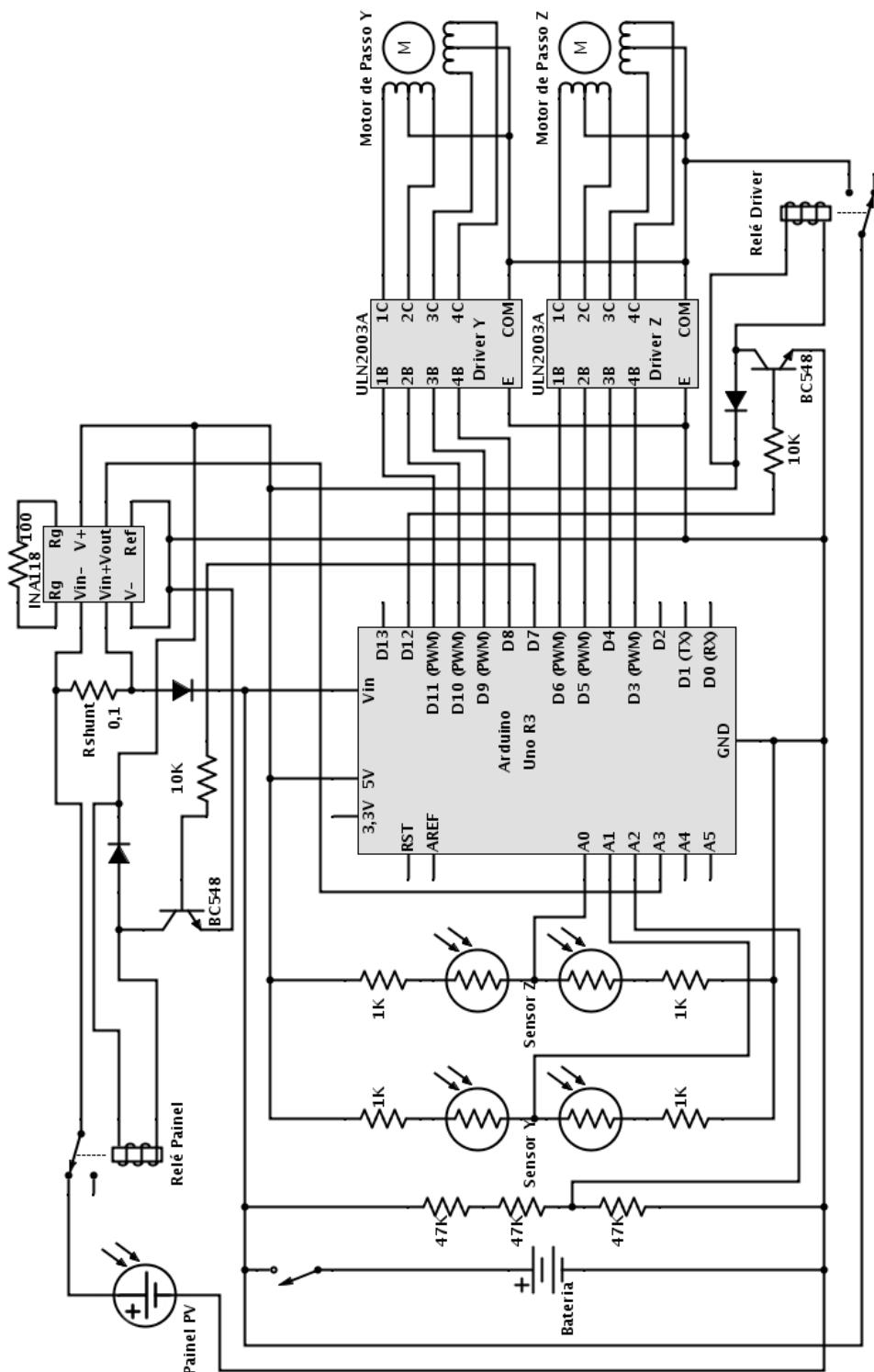


Figura 21 – Esquemático do protótipo 2.