

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

FAUSTO BATISTA FELIX SILVA

**PROPOSTA DE AUTOMATIZAÇÃO DA CAPTAÇÃO DE RAIOS  
SOLARES PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2015

FAUSTO BATISTA FELIX SILVA

**PROPOSTA DE AUTOMATIZAÇÃO DA CAPTAÇÃO DE RAIOS  
SOLARES PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização, apresentado ao Curso de Especialização em Automação Industrial, do Departamento Acadêmico de Eletrônica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Leandro Stebel

Coorientador: Prof. Msc. Marco Tulio Siqueira

CURITIBA  
2015

Fascinante é olhar para o passado e constatar, quantos sacrifícios, quantos esforços, quantas preocupações e quantos obstáculos superados, mas é ainda mais fascinante olhar para o futuro com fé, sabendo que existe um só Deus, que sempre me acompanha mostrando que para ele todas as coisas são possíveis, basta apenas crer, por isso, dedico essa vitória primeiramente a Deus pela vida e durante toda a minha caminhada esteve sempre ao meu lado me carregando em seus braços e operando grandes milagres.

## RESUMO

SILVA, Fausto B. F. **Proposta de automatização da captação de raios solares para sistemas fotovoltaicos**. 2015. 52 f. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015

Em função da crescente demanda na produção de energia elétrica em todo mundo é necessário, pensar em alternativas para suprir a necessidade desse crescimento. Atualmente em diversos países, estão sendo desenvolvidas fontes renováveis de energia que, ajudam a aumentar a produção de energia e em contra partida colaboram para que essas energias sejam limpas, sem danificar o meio ambiente o que significa não emitir combustíveis fósseis. Uma das alternativas de energia limpa é a energia fotovoltaica, que transforma energia solar em energia elétrica através de painéis solares. Esse trabalho tem como finalidade propor uma solução da automatização da captação do sol através dos painéis solares, pois uma vez que o painel é instalado de forma fixa, não irá obter uma ótima eficiência energética levando em consideração que o sol muda sua trajetória ao longo dos dias e do ano. É apresentado nesse trabalho também pesquisas realizadas referente ao tema que mostram o estado da arte, assim é possível propor melhorias em relação aos sistemas já existentes. O Trabalho não tem como finalidade fazer a concepção do projeto, mas sim uma pesquisa que avalie a viabilidade da implantação da automatização e controle da captação de energia solar.

**Palavras chave:** Energia Solar. Placas fotovoltaicas. Rastreamento automático do sol.

## ABSTRACT

SILVA, Fausto B. F. **Proposta de automatização da captação de raios solares para sistemas fotovoltaicos**. 2015. 52 f. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial), Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015

Due to growing demand in electricity production worldwide is necessary, consider alternatives to meet the need that growth. Currently in several countries, renewable energy sources are being developed that help increase energy production and to start collaborating so that these energies are cleaned without damaging the environment which means not issue fossil fuels. One of clean energy alternatives is photovoltaics, which converts solar energy into electrical energy through solar panels. This work aims to propose a solution automating the capture sun through solar panels, because once the panel is installed in fixed form, will not get a good energy efficiency taking into account that the sun changes its function in the trajectory day and year. It is presented in this paper also carried out research related to the theme that show the state of the art, so it is possible to propose improvements over existing systems. The work is not intended to make the project design, but a survey to assess the feasibility of the implementation of automation and control of automatic sun tracking.

**Key-words:** Solar Energy. Photovoltaic panels. Automatic Sun Tracking.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 - Comparação entre diferentes tecnologias .....	24
Figura 1 - Potencial de energia Fotovoltaica .....	17
Figura 2 - Estrutura de uma célula fotovoltaica .....	18
Figura 3 - Célula de Silício Monocristalino .....	19
Figura 4 - Célula de Silício Policristalino .....	20
Figura 5 - Célula de Filmes Finos.....	21
Figura 6 - Célula Fotovoltaica Orgânica.....	23
Figura 7 - Posição e Espectro Solar .....	26
Figura 8 - Posição do sol em relação aos ângulos azimutal, zenital e da altura solar. ....	26
Figura 9 - Características de Automatização.....	27
Figura 10 - Orientação Solar durante o dia .....	28
Figura 11 - Diagrama Solar de Curitiba.....	28
Figura 12 - Movimento aparente do sol.....	29
Figura 13 - Módulo solar com dois graus de liberdade de rastreamento .....	30
Figura 14 - Arduíno Uno.....	31
Figura 15 - Ligação do Arduino para o Motor de Passo .....	32
Figura 16: Kit Arduíno e motor.....	32
Figura 17 - Eficiência das células solares .....	34
Figura 18 - Comparação de eficiência .....	35
Figura 19 - Inversor grid-tie .....	36
Figura 20 - Esquema de ligação do sistema de energia .....	37
Figura 21 - Posicionamento do Sol 09:50h .....	38
Figura 22 - Posicionamento do Sol 10:50h .....	39
Figura 23 - Posicionamento do Sol 11:50h .....	39
Figura 24 - Posicionamento do Sol 12:50h .....	40
Figura 25 - Posicionamento do Sol 13:50h .....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Característica Solar.....	25
Tabela 2 - Custo de sistema automático de rastreamento solar.....	41
Tabela 3 - Percentual do aumento sobre a potência média .....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
MEMS	Sistema Micro Eletro-Mecânico ( <i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i> )
PIC	<i>Peripheral Interface Controller</i> (Controlador de Interface Periférica)
PV	<i>Photovoltaic</i> (Fotovoltaico)



## LISTA DE SIMBOLO

A	Ampère
C	Celsius
G	Giga
k	kilo
p	Pico
V	Volts
W	Watts
Υ	Letra grega minúscula Gamma
θ	Letra grega minúscula Theta
m	mili
μ	micro

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1	TEMA.....	11
1.2	DELIMITAÇÃO DO ESTUDO .....	12
1.3	PROBLEMA.....	12
1.4	OBJETIVOS .....	13
<b>1.4.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>13</b>
<b>1.4.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>13</b>
1.5	JUSTIFICATIVA.....	13
1.6	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	14
1.7	EMBASAMENTO TEÓRICO .....	15
1.8	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>17</b>
2.1	O POTENCIAL DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL .....	17
2.2	CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	18
2.3	TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS .....	18
<b>2.3.1</b>	<b>Célula de Silício Monocristalino</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Célula de Silício Policristalino</b> .....	<b>20</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Filmes Finos</b> .....	<b>20</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Silício Amorfo</b> .....	<b>21</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Filme Fino de Silício Microcristalino</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3.6</b>	<b>Células de Telureto de Cadmio</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3.7</b>	<b>Células de CIGS</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3.8</b>	<b>Células Solares Orgânicas</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3.9</b>	<b>Comparação entre Diferentes Tecnologias</b> .....	<b>23</b>
2.4	MOTOR DE PASSO.....	24
2.5	TRAJETÓRIA SOLAR .....	24
<b>2.5.1</b>	<b>Ângulo Azimutal</b> .....	<b>25</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Altitude Solar</b> .....	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>27</b>
3.1	TRAJETÓRIA SOLAR.....	27
<b>3.1.1</b>	<b>Trajectoria Solar durante o dia</b> .....	<b>27</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Trajectoria Solar durante o ano</b> .....	<b>28</b>
3.2	MOVIMENTAÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	29

<b>3.2.1</b>	<b>Graus de Liberdade.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Controlador .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Acionamento do Motor de Passo.....</b>	<b>31</b>
<b>3.3</b>	<b>GERAÇÃO DE ENERGIA .....</b>	<b>33</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Painel Fotovoltaico .....</b>	<b>33</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Eficiência Energética.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Inversor solar.....</b>	<b>35</b>
<b>3.4</b>	<b>PROTÓTIPO DE FUNCIONAMENTO.....</b>	<b>37</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Variação do ângulo das placas.....</b>	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>43</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>44</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>46</b>
	<b>ANEXO A – DATASHEET PLACA FOTOVOLTAICA MODELO KC 130 TM.....</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O capítulo que se segue apresenta o tema do trabalho mostrando a energia solar como fonte de energia renovável, apresenta a delimitação do estudo, o problema e justificativa referentes ao tema, os objetivos do trabalho, também os procedimentos metodológicos, sua estrutura e o cronograma de atividades que serão realizadas.

### 1.1 TEMA

Uma das principais fontes de energia do planeta é o sol, que emite à Terra uma grande quantidade de energia nas formas de luz e calor, capaz de suprir toda a necessidade mundial no que diz respeito à utilização desse tipo de energia frequentemente associada como fontes renováveis. Uma grande vantagem de se utilizar uma energia limpa é que praticamente não gera resíduo comparado com combustíveis fósseis, que geram grande quantidade de resíduos ou emissão de poluentes ao meio ambiente e é uma alternativa para o exponencial crescimento da demanda de energia elétrica em todo o mundo (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

A energia solar pode ser aproveitada de duas formas, como energia fototérmica, que consiste na captação da irradiação solar e na conversão direta em calor com o objetivo de aquecer a água utilizando diretamente o calor do sol, sem a necessidade da utilização de outros recursos. Também outra forma de utilização é da energia solar fotovoltaica que consiste na conversão direta da luz em energia elétrica pelo efeito fotovoltaico (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

O que difere as duas formas de utilização de energia solar é que ao contrário do sistema fototérmico que é empregado para aquecimento, os sistemas fotovoltaicos têm a capacidade de captar diretamente a luz solar e produzir diferença de potencial através de placas fotovoltaicas fixas em telhados e fachadas, processada por dispositivos controladores e conversores, podendo ser armazenada em baterias ou utilizada diretamente em sistemas conectados a rede elétrica (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Esse estudo trata do tema inerente a captação de raios solares para sistemas fotovoltaicos. A pesquisa a ser realizada converge para uma revisão do estado da arte do tema abordado com os apontamentos dos efeitos da captação de energia solar ser feito em módulos fotovoltaicos fixos em telhados ou fachadas, do melhor ângulo de captação de luz e do mapeamento da trajetória do sol.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Segundo Villalva e Gazoli não existe um consenso que determina o melhor método para escolher o melhor ângulo de inclinação de um módulo fotovoltaico, mas é possível determinar para uma determinada latitude geográfica um ângulo de inclinação que possibilite uma adequada produção média de energia ao longo do ano.

O estudo objetiva focar em analisar soluções para automatização desse processo buscando referências de soluções aplicadas para esse problema e dentro dessas referências apontar melhorias que possam ser feitas para que haja uma melhoria na captação de energia e como consequência ter uma melhor eficiência nesse sistema.

## 1.3 PROBLEMA

Atualmente a utilização da energia solar fotovoltaica no Brasil é empregada além de residências, em pequenas indústrias, em áreas rurais, centrais remotas de telecomunicações e programas do governo como programa Luz para Todos (PORTAL BRASIL, 2014). Futuramente a energia solar fotovoltaica estará concentrado nos sistemas conectados à rede elétrica (MOLGARO, 2014).

Hoje a energia produzida por esse sistema de captação, tem sua eficiência energética um tanto quanto limitada em função do quanto de luz cada módulo fotovoltaico é capaz de captar devida sua instalação ser de forma fixa. Em função do ângulo de inclinação do módulo em ser fixo não se consegue maximizar a captação dos raios solares em todos os dias ou meses do ano nem ao longo do dia, fazendo-se necessário adotar um ângulo que possibilite uma produção média de energia em todas as estações do ano, pois com a escolha incorreta da inclinação, reduz a captação dos raios solares e compromete a produção de energia elétrica pelo módulo fotovoltaico (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Não existe consenso geral sobre o melhor método de escolher o ângulo de inclinação para a instalação de um módulo solar, então: **Como fazer a automatização da captação de raios solares para sistemas fotovoltaicos e assim ter uma melhor eficiência energética em todos os períodos do ano?**

Acredita-se que com um estudo do estado da arte e as propostas apresentadas ao decorrer deste trabalho, possa se chegar a uma melhoria no sistema de automação da captação de raios solares.

## 1.4 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho, relativos ao problema anteriormente apresentado.

### 1.4.1 Objetivo Geral

Este projeto tem como objetivo apresentar uma proposta de automatização da captação de raios solares através do melhor ângulo de incidência solar aumentando sua eficiência energética levantando as características necessárias para a automatização desse processo.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Comparar a eficiência energética de placas fotovoltaicas que são instaladas em pontos fixos;
- Mapear o ângulo de declinação solar em diferentes dias do ano;
- Comparar as vantagens e desvantagens de um sistema de captação de energia solar acompanhando a trajetória do sol;
- Identificar no estado da arte os elementos de automatização desse sistema.

## 1.5 JUSTIFICATIVA

A maior parte dos sistemas fotovoltaicos são constituídos por placas que possuem ângulo fixo de inclinação. Com as placas em inclinação fixa não se consegue maximizar a captação dos raios solares em todos os dias ou meses do ano, fazendo-se necessário adotar um ângulo que possibilite uma razoável produção média de energia ao longo do ano e ao longo do dia, com isso a escolha incorreta da inclinação reduz a captação de raios solares e compromete a produção de energia elétrica bem como também sua eficiência energética (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Um sistema de automatização para a captação de raios solares para sistemas fotovoltaicos ou o rastreamento automático da posição do sol pode otimizar o ângulo de incidência de raios solares automaticamente ao longo do dia e ao longo dos meses do ano levando em consideração que devido à existência do ângulo de declinação solar, o sol nasce e

se põe em diferentes pontos do céu e descreve uma trajetória com inclinação diferente em cada dia do ano.

A automatização do processo aumentará a captação de energia nos módulos solares rastreando o movimento do sol tendo assim maior eficiência energética, pois fará com que as placas fotovoltaicas estejam sempre recebendo os raios solares com melhor ângulo de incidência possível.

## 1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Em termos de classificação da pesquisa, esta é uma pesquisa que busca uma resposta ao problema objeto deste estudo, ou seja, uma pesquisa aplicada e o desenvolvimento desse trabalho será composto por algumas etapas que envolvem: o estudo para definir soluções ou características para automatização do processo de captação de energia solar, a medição de energia gerada por placas fixas, mapeamento da trajetória do sol em dias e meses diferentes do ano.

O estudo sobre as soluções para a automatização será feito a partir de literaturas já existentes, verificando os métodos mais utilizados e assim propor melhorias viáveis para a otimização da captação de energia solar, sob a forma de uma pesquisa bibliográfica. Para medição de energia por placas fixas, o objetivo é medir a eficiência energética desse tipo de instalação para depois comparar com placas que acompanham a trajetória do solar. Para o mapeamento da trajetória do sol, o estudo contará com um *software* em função de que para uma análise completa é necessária ter o mapeamento de todos os períodos e estações do ano.

Dentre as literaturas existentes sobre o assunto, existe um estudo feito em Bucareste que apresenta dois tipos de rastreadores automáticos eletro-mecânicos. No primeiro estudo, os detectores de energia solar são por células fotovoltaicas, ou resistências térmicas. Dois dispositivos estão conectados em um circuito diferencial: o primeiro dispositivo recebe radiação de desvio do leste em direção do sol e o segundo dispositivo recebe a radiação vinda do oeste na direção do sol. Quando as placas fotovoltaicas são orientadas para o sol, os sinais dos detectores não detectam sinal de erro, em todas as outras situações um sinal de erro faz o motor seguir o movimento do sol a partir de um sistema de controle até o erro ser corrigido. O segundo estudo mostra um procedimento de monitoramento de baixo custo, no método de comparação com base na amplitude e um microdetector de sinal especial, feito com a tecnologia de Sistema Micro Eletro-Mecânico (MEMS). O procedimento permite rotações

simples do painel com base em rastreamento completo, por azimute e altura solar, a partir de um ângulo de regulação pré-determinado no intervalo de 30 -150° (MILEA *et al*, 2007).

Outro projeto de rastreamento automático apresentado em um simpósio de excelência em gestão e tecnologia mostra 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 independentes da relação de coordenadas solares. Utiliza dois motores de corrente contínua que atuam nos eixos vertical e horizontal onde foi controlado por um microcontrolador PIC. (RIBEIRO, PRADO, GONÇALVES, 2012).

## 1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO

Em relação ao tema de diagrama e mapeamento solar, Lamberts (2012), sobre as características de automatização do sistema, MILEA *et al*, (2007), Ribeiro, Prado, Gonçalves (2012) e Trevelin (2014). Já no que se refere a conceitos ao posicionamento solar, ângulos solares e fundamentos teóricos Villalva e Gazoli (2012).

## 1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho terá a estrutura abaixo apresentada.

**Capítulo 1 - Introdução:** são apresentados o tema, as delimitações do estudo, o problema, os objetivos da pesquisa, a justificativa, os procedimentos metodológicos, as indicações para o embasamento teórico, a estrutura geral do trabalho e o cronograma das atividades a serem realizadas.

**Capítulo 2 – Fundamentação Teórica:** são abordados os fundamentos de funcionamento, as diferentes tecnologias e os dispositivos utilizados na automatização do sistema, bem como também uma fundamentação sobre a trajetória solar.

**Capítulo 3 – Desenvolvimento:** mostra o mapeamento solar para determinar a trajetória solar e com isso são levantadas as características para a proposta de automatização.

**Capítulo 4 – Resultados e discussões:** são discutidos os resultados obtidos com o sistema de rastreamento automático de captação solar, com base nas especificações inicialmente propostas.

**Capítulo 5 – Considerações finais:** são retomados a pergunta de pesquisa e os seus objetivos e apontado como foram solucionados, respondidos, atingidos, por meio do trabalho realizado.



Além disto, são sugeridos trabalhos futuros que podem ser realizados a partir do estudo realizado.

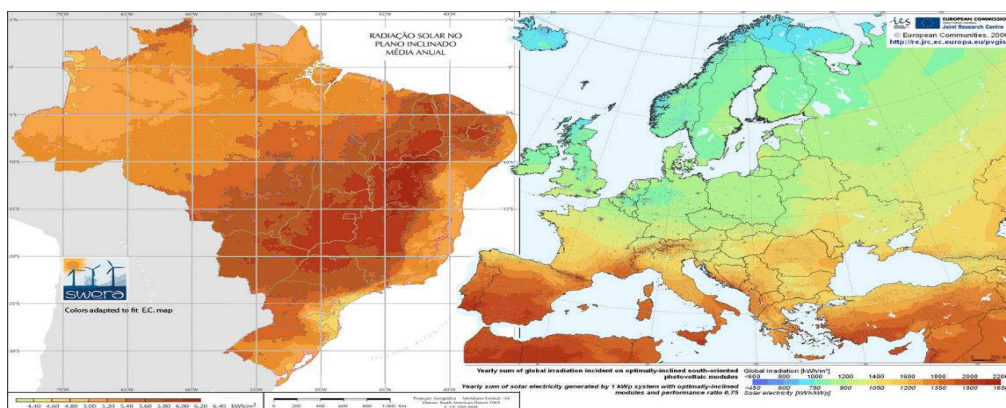
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para começar o estudo acerca da automatização da captação de raios solares para sistemas fotovoltaicos foi necessário compreender o potencial da energia fotovoltaica no Brasil, os fundamentos de funcionamento desse sistema, os diferentes tipos de células fotovoltaicas, elementos para o processo de automatização, o funcionamento e tipos de sensores, e uma análise sobre a trajetória do sol. Assuntos que serão tratados no decorrer deste capítulo.

### 2.1 O POTENCIAL DA ENERGIA FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Com o avanço tecnológico e o crescimento industrial em todo mundo, houve um crescimento exponencial da produção de energia elétrica, o que gera preocupação em função da forma em que a energia é produzida, o que muitas vezes gera prejuízos ao meio ambiente. Como forma de produzir energia elétrica de forma limpa, a tecnologia de geração de energia fotovoltaica tem ganhado cada vez mais espaço para uso em veículos e estações geradoras de energia em residências e pequenas indústrias (Villullas *et al*, 2011).

A muito tempo a energia fotovoltaica é utilizada como forma de produção de energia limpa e sustentável, que se baseia na fonte renovável de energia mais abundante e amplamente disponível no planeta que é o sol. Embora o Brasil tenha um grande potencial para gerar energia fotovoltaica apenas 1GWh é produzido de energia, enquanto na Europa possui instalados 88GWh de energia fotovoltaica. A Figura 1 faz uma comparação dos valores de irradiação solar do Brasil e da Europa (Portal Solar, 2015).

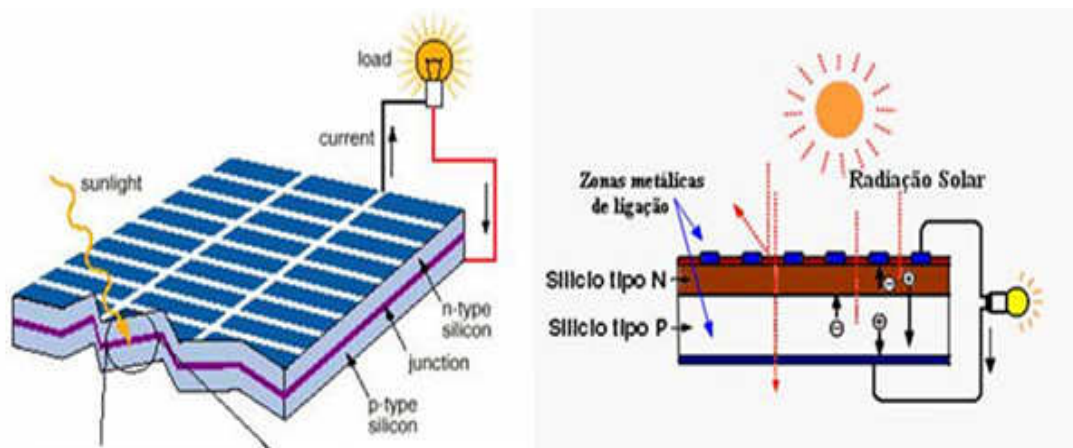


**Figura 1 - Potencial de energia Fotovoltaica**  
**Fonte: Portal Solar (2015)**

## 2.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

O Efeito Fotovoltaico é um fenômeno físico no qual a luz solar é convertida em eletricidade que ocorre quando, a luz ou radiação eletromagnética do sol que é composta de fótons que possui grande quantidade de energia incide em uma célula que possui em sua composição materiais semicondutores. Os materiais semicondutores da célula geralmente de silício são do tipo N e o tipo P, embora ambos os materiais sejam eletricamente neutros, o silício tipo N tem elétrons (-) em excesso e o tipo P (+) tem lacunas em excesso. Intercalando estes, cria-se uma junção P-N e um campo elétrico. Quando estes dois semicondutores são intercalados, os elétrons em excesso do tipo N fluem para o semicondutor do tipo P, e os elétrons que deixaram o tipo N criam então lacunas no mesmo. Pelo fluxo de elétrons e lacunas, os dois semicondutores agem como uma bateria e criam um campo elétrico na junção P-N. É este campo que faz com que os elétrons fiquem disponíveis para o circuito elétrico. No mesmo instante, as lacunas se movem para a direção oposta, para a superfície positiva onde elas esperam elétrons livres (Molgaro, 2014).

A Figura 2 mostra a Estrutura de uma célula fotovoltaica composta por um material semicondutor com camadas P e N.



**Figura 2** - Estrutura de uma célula fotovoltaica

**Fonte:** Viridian (2015)

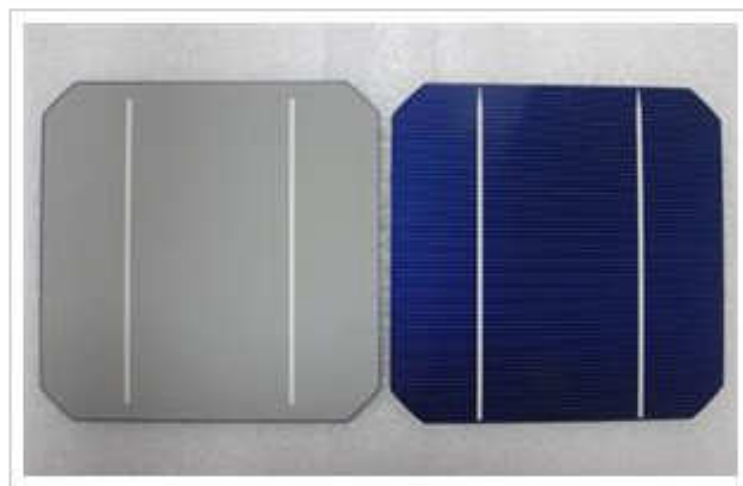
## 2.3 TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Atualmente existem diversas tecnologias e materiais para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos, sendo as mais comuns as células de silício, filme fino e também como

uma solução para propiciar melhor versatilidade na captação de energia as células feitas a partir de material orgânico. A seguir serão apresentadas características dessas diferentes tecnologias.

### 2.3.1 Célula de Silício Monocristalino

As células de silício monocristalino são concebidas com a utilização de blocos de silício com elevado grau de pureza aquecidos em altas temperaturas e submetidos a um processo de formação de cristal chamado método de Czochralski, que resulta no produto denominado lingote de silício monocristalino, constituído de uma única estrutura cristalina possuindo uma organização molecular homogênea. O lingote formado é fatiado produzindo *wafers* e só depois são submetidos a processos químicos recebendo impurezas em ambas faces, formando assim as camadas P e N constituindo assim a base para o funcionamento da célula fotovoltaica. Somente após a conclusão desses processos, a placa recebe uma película metálica em uma das faces, uma grade metálica na outra face e uma camada de material antireflexivo que irá receber a luz, obtendo o produto final da célula de silício monocristalino como mostra a Figura 3 (Villalva, Gazoli, 2012).



**Figura 3 - Célula de Silício Monocristalino**  
**Fonte:** Topsy (2011)

Embora tenha um custo de produção mais elevado em relação a outras células fotovoltaicas, as células de silício monocristalino são as mais eficientes encontradas comercialmente devido obter uma melhor eficiência energética entre 15 e 18%

### 2.3.2 Célula de Silício Policristalino

O processo de produção dessa célula é obtido por lingotes que formados por um aglomerado de pequenos cristais com tamanhos e orientações diferentes. Assim como as células de silício monocristalino, essas células também são cortadas para produzir *wafers* que serão transformadas em células fotovoltaicas que tem como cor predominante o azul, mas pode mudar em função material antireflexivo como mostra a Figura 4. A vantagem de se usar uma célula de silício policristalino é por obter um menor custo de fabricação do que a de monocristalino entretanto tem uma menor eficiência comercial que gira em torno de 13 e 15% (Villalva, Gazoli, 2012).



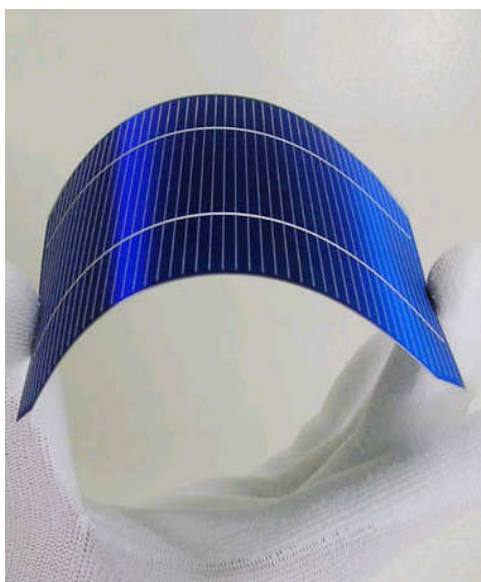
**Figura 4** - Célula de Silício Policristalino  
**Fonte:** Topsy (2011)

### 2.3.3 Filmes Finos

Entre as tecnologias recentes para produção de células fotovoltaicas, estão os filmes finos, que diferente das tecnologias utilizando silício de cristal, utiliza também outros materiais que podem ser aplicados sobre uma base rígida ou flexível. A vantagem da produção desse tipo de célula é a pequena quantidade de matéria prima utilizada e o processo de deposição, que pode ser por vaporização ou outro método, reduzindo assim desperdícios que ocorrem em outros métodos, como a de serragem para criação de *wafers* e também a

temperatura de fabricação é bastante inferior, sendo entre 200 e 500°C, em relação às temperaturas de até 1500°C, utilizadas na fabricação de células cristalinas. Como na fabricação dos filmes finos tem um grau de complexidade menor e sua matéria prima consome pouca energia, seu custo também é menor, sendo assim possível uma produção em larga escala e em diversas dimensões.

Apesar do custo ser menor, sua eficiência energética também acaba sendo menor, sendo necessária uma maior área de módulos para produzir a mesma energia que produzem as células de silício cristalino, o que não é difícil uma vez que as células de filmes finos tem um melhor aproveitamento da luz solar (Villalva, Gazoli, 2012). A Figura 5 mostra uma célula de filme fino sobre uma base flexível.



**Figura 5** - Célula de Filmes Finos  
**Fonte:** Almaks (2015)

#### 2.3.4 Silício Amorfo

Foi a primeira tecnologia de filme fino desenvolvida, tem uma eficiência energética entre 5 e 8% o que é muito baixa se comparada com células cristalinas onde essa porcentagem fica ainda menor, pois devido sua degradação induzida pela luz após 12 meses sua eficiência fica menor até se tornar estável (Villalva, Gazoli, 2012).

### 2.3.5 Filme Fino de Silício Microcristalino

Essa tecnologia une as vantagens do silício cristalino e a tecnologia de fabricação dos filmes finos o que faz com que possa ser produzida em larga escala, tenha um menor custo, menor desperdício e maior eficiência que é em torno de 8,5%. Sua fabricação é feita em duas etapas sendo uma em alta temperatura e outra em baixa temperatura (Villalva, Gazoli, 2012).

### 2.3.6 Células de Telureto de Cadmio

As células de Telureto de Cadmio (CdTe) embora sejam mais eficientes dentro da família dos filmes finos atingindo 14,40% de eficiência, não é possível produzi-las em larga escala devido o cadmio (Cd) ser um matéria tóxico e o telúrio (Te) ser uma material difícil de ser encontrado (Villalva, Gazoli, 2012).

### 2.3.7 Células de CIGS

A célula de CIGS (Cobre, Índio, Gálio e Seleneto) ainda é pouca utilizada comercialmente devido seu custo seja bastante elevado embora seu aspecto construtivo não empregar materiais tóxicos e sua eficiência energética alcance até 14% (Villalva, Gazoli, 2012).

### 2.3.8 Células Solares Orgânicas

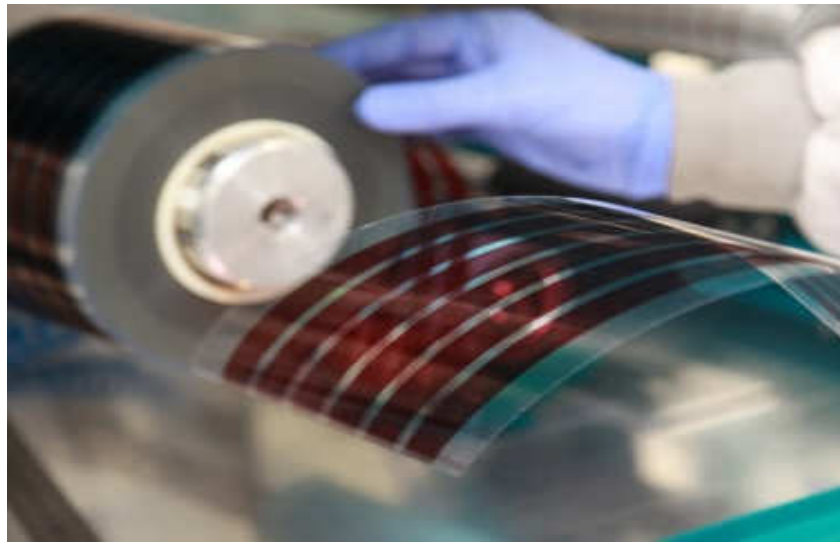
As células solares orgânicas são feitas a partir de carbono. Ao contrário dos painéis solares de silício feitos em uma base rígida, as células solares orgânicas são produzidas sobre um material plástico flexível, onde os componentes são depositados por uma técnica de impressão, o que se torna uma vantagem visto que essa técnica permite uma produção em larga escala.

"O carbono tem potencial para oferecer elevado desempenho a baixo custo. Pelas nossas melhores informações, esta é a primeira demonstração de uma célula solar funcional que tem todos os seus componentes feitos de carbono", explicou a Dra. Zhenan Bao, da Universidade de Stanford (INEO,2015).

A célula solar orgânica é formada por uma camada fotoativa, que absorve a luz do sol, aplicada entre dois eletrodos. A camada ativa é formada por nanotubos de carbono e fulerenos (*buckyballs*). Os eletrodos, por sua vez, em uma célula solar orgânica típica são feitos de

metais - ouro, prata ou cobre - e óxido de estanho-índio (ITO), o material usado nas telas sensíveis ao toque (INEO,2015).

A vantagem de utilização desse tipo de célula é o menor custo em relação a células de silício e possui elevada eficiência energética que gera em torno de 21% e por serem fabricados por um processo de impressão podem ser instaladas de forma mais flexível como mostra a Figura 6.



**Figura 6 - Célula Fotovoltaica Orgânica**  
**Fonte: CSEM (2013)**

### 2.3.9 Comparação entre Diferentes Tecnologias

Painéis solares de película fina representaram 11% de todas as vendas de painéis solares em 2011. A capacidade de produção deverá crescer a uma taxa anual de 24%, atingindo mais de 22 GW até 2020 (ou uma quota de mercado global de 38% em termos de produção de módulos). Existem três tipos principais de painéis solares de película fina no mercado hoje: silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe) e cobre, índio e gálio seleneto (CIS / CIGS). No Quadro 2 você pode ver as suas principais características:



	a-Si	CdTe	CIGS
Melhor eficiência	13,40%	19,00%	20,40%
Módulo com maior eficiência	8,10%	14,40%	14,50%
Ação de mercado de Película Fina	32,00%	43,00%	25,00%
Vantagens	Tecnologia excelente para pequenos dispositivos	Baixo custo de produção	Alta eficiência
Desvantagens	Baixa eficiência e equipamento de alto custo	Eficiência média, vidro rígido e componentes altamente tóxicos do cádmio	Demora no crescimento devido a ação de mercado de processo tradicional ser cara. Necessita menos cádmio do que CdTe nas células solares
Principais Fabricantes	Sharp	First Solar	Solar Frontier

**Quadro 1** - Comparação entre diferentes tecnologias  
**Fonte:** Energy Informative (2015)

## 2.4 MOTOR DE PASSO

Os motores de passo embora sejam bastante utilizados na área da indústria da informática, têm sido bastante utilizados fora dela também como em aplicações militares, médicas, comercial e automação, pois o motor de passo é um dispositivo que converte uma entrada em forma digital para uma saída mecânica.

O seu aspecto construtivo consiste de um estator com ranhuras, equipado com duas ou mais bobinas individuais e um rotor sem enrolamento. O motor é classificado a partir de sua construção que envolve o uso ou não de ímã permanente, ou seja, se usado o ímã é classificado como motor de passo de ímã permanente, caso não seja utilizado o ímã é classificado como motor de passo de relutância (TORO, 1994).

O seu princípio de funcionamento consiste na utilização de duas solenoides alinhadas duas a duas que ao serem energizadas fazem com que o rotor se atraia à elas fazendo com que se alinhe ao eixo determinada pela solenoide, fazendo com que haja uma variação no ângulo (Santos, 2008).

## 2.5 TRAJETÓRIA SOLAR

Devido à existência do ângulo de declinação solar, o sol nasce e se põe em diferentes pontos do céu e descreve uma trajetória com inclinação diferente em cada dia do ano. No movimento de rotação a terra gira ao redor de um eixo Leste-Oeste caracterizada pelo ângulo

azimutal, que passa por seus pólos, originando o dia e a noite. O movimento de translação da terra é feito no eixo Norte-Sul determinando as quatro diferentes estações do ano onde para cada uma o sol tem uma movimentação característica como o solístico que é a época em que o sol passa pela sua maior declinação boreal ou austral, e durante a qual cessa de afastar-se do equadore e também o Equinócio que é o ponto da órbita da terra em que se registra uma igual duração do dia e da noite. Esses eventos ocorrem em função das estações do ano conforme a tabela 1 (Lamberts, 2015).

**Tabela 1** - Característica Solar

Data	Denominação
21 de março	Equinócio de outono
21 de setembro	Equinócio de primavera
21 de junho	Solstício de inverno
21 de dezembro	Solstício de verão

**Fonte:** Lamberts 2015

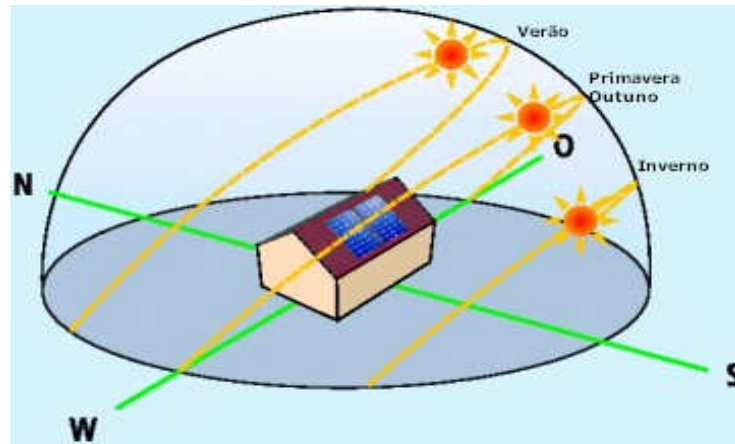
### 2.5.1 Ângulo Azimutal

O ângulo azimutal ou zimute solar é o ângulo de orientação dos raios solares em função do norte geográfico descrevendo-se ao longo do dia, com isso se um observador estiver localizado no hemisfério sul, dependendo da hora do dia o sol estará em uma posição diferente, na esquerda ou à direita do observador e ao meio dia o sol estará exatamente a sua frente o que significa que o ângulo azimutal é nulo (Villalva, Gazoli, 2012).

Para observadores localizados no hemisfério norte o ângulo azimutal é medido em relação ao sul geográfico.

### 2.5.2 Altitude Solar

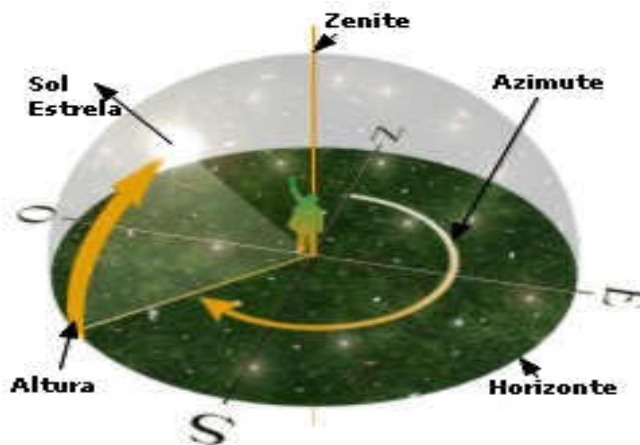
A cada dia do ano o sol nasce e se põe em diferentes pontos no céu descrevendo assim trajetórias com inclinações diferentes, isso devido a existência dos ângulos de declinação solar conforme mostra a Figura 7.



**Figura 7 - Posição e Espectro Solar**  
**Fonte: Electrónica (2015)**

Fazendo uma observação em direção ao norte em dias de verão o ângulo azimutal é menor, em dias de inverno a altura solar no céu é menor o que faz com que se observe o sol mais baixo perto da linha do horizonte, com isso o ângulo azimutal e a massa de ar percorrida pelos raios solares são maiores do que no verão. O ângulo da altura solar ( $\gamma_s$ ) depende da localização geográfica do observador e também do ângulo da declinação solar, ou seja, se o observador estiver próximo à linha do equador, enxergará alturas solares maiores e se estiver próximos dos polos terrestres enxergam alturas menores (Trevelin 2014).

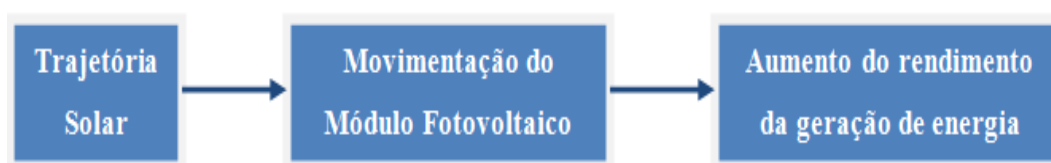
Contudo para uma análise da trajetória do sol é necessário considerar o movimento de rotação da terra no eixo leste-oeste, caracterizado pelo ângulo azimutal ( $\theta_a$ ) e o movimento de translação no eixo norte-sul, caracterizado pelo ângulo da altura solar ( $\gamma_s$ ) conforme mostra a Figura 8. Essa variação angular tem um impacto na geração de energia elétrica por um painel fotovoltaico causando muitas vezes baixa eficiência energética dependendo de vários fatores como horário do dia, mês e até mesmo estação do ano (Trevelin 2014).



**Figura 8 - Posição do sol em relação aos ângulos azimutal, zenital e da altura solar.**  
**Fonte: Electrónica (2015)**

### 3 DESENVOLVIMENTO

Para a apresentação de uma proposta de automatização da captação de raios solares para sistemas fotovoltaicos, é necessário levantar as características que compõe essa automatização que serão apresentadas ao longo deste capítulo. A Figura 9 mostra a composição das características para a automatização.



**Figura 9** - Características de Automatização

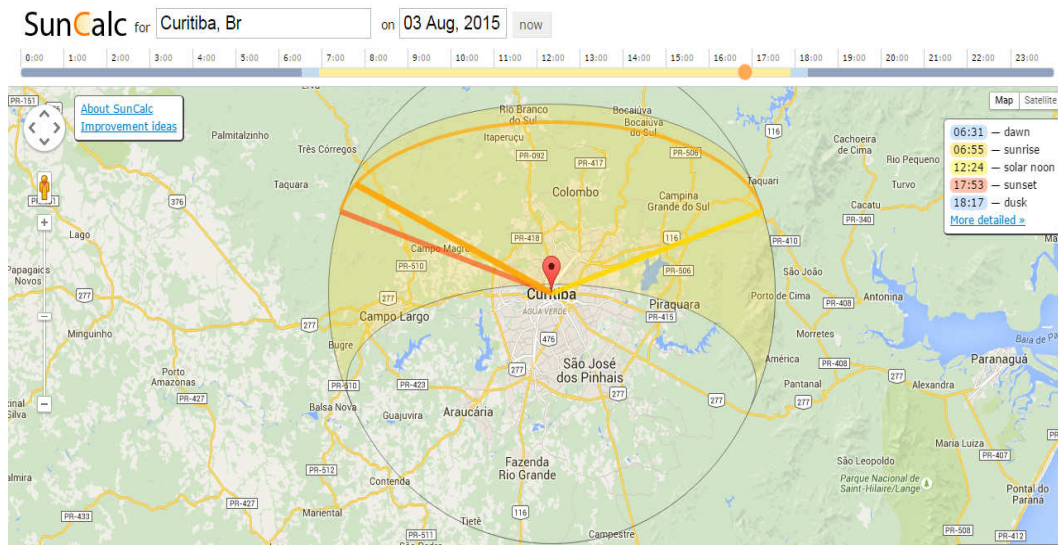
**Fonte:** O autor

#### 3.1 TRAJETÓRIA SOLAR

Em função da proposta da automatização ter como um dos objetivos fazer com que as placas fotovoltaicas (PV) acompanhem a trajetória do sol, a seguir serão apresentados as diferentes trajetórias do sol.

##### 3.1.1 Trajetória Solar durante o dia

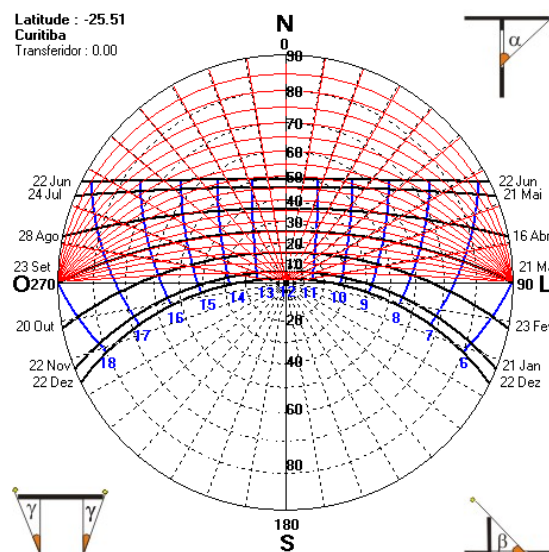
É possível analisar durante o dia que o sol nasce e se põem em diferentes lugares durante o dia, com isso traça diferentes ângulos conforme vai mudando sua trajetória ao longo do dia. A Figura 10 mostra a trajetória solar em Curitiba ao longo de um dia, onde analisando a figura é possível ver as posições do sol ao nascer e ao pôr do sol. A curva mais fina indica a atual trajetória do sol, e a área amarela em torno indica a variação das trajetórias de sol durante o ano. As cores na barra de tempo da figura mostram a cobertura luz solar durante o dia, indicando o amanhecer às 06:31h, o nascer do sol às 06:55h, o meio dia solar às 12:24h, o pôr do sol às 17:53 e anoitecer às 18:17h.



**Figura 10 - Orientação Solar durante o dia**  
**Fonte: SunCalc (2015)**

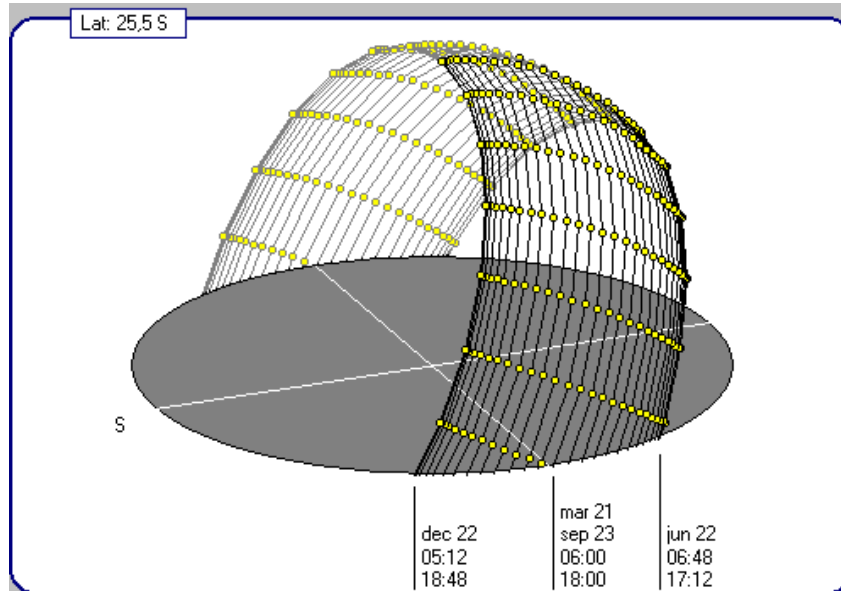
### 3.1.2 Trajetória Solar durante o ano

O primeiro passo para determinar o controle automático do ângulo das placas fotovoltaicas, é determinar a trajetória solar ao longo do ano em função da latitude da cidade para visualizar o ângulo de inclinação do sol em períodos diferentes. A Figura 11 mostra a carta solar da cidade de Curitiba indicando a latitude de  $25,51^\circ$  e as variações existentes em diferentes períodos



**Figura 11 - Diagrama Solar de Curitiba**  
**Fonte: Software SOL-AR 6.2**

Para uma melhor visualização da trajetória solar na cidade de Curitiba, a Figura 12 mostra um diagrama da movimentação aparente do sol com uma latitude de  $25,5^\circ$  obtida através da figura anterior.



**Figura 12** - Movimento aparente do sol

**Fonte:** *Software Sunpath 1.0*

Com o diagrama e a determinação do movimento solar é possível visualizar a inclinação da trajetória do sol em diferentes épocas do ano. Essa inclinação influencia diretamente na eficiência energética produzida pelas placas fotovoltaicas, uma vez que as placas são instaladas de forma fixa, o que significa que em função do movimento solar, dependendo da época do ano, a placa terá maior ou menor eficiência.

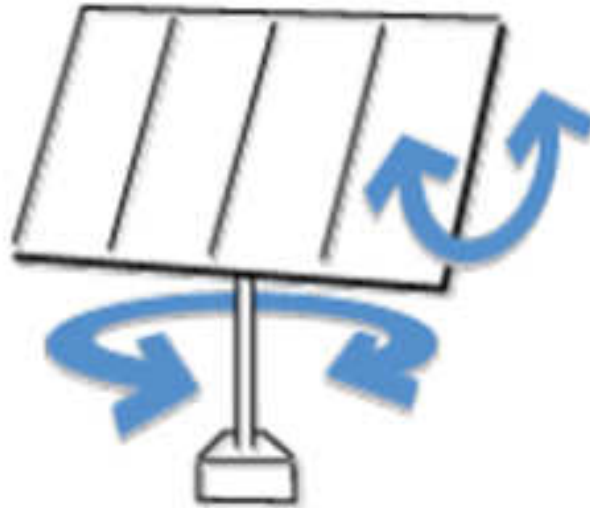
### 3.2 MOVIMENTAÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

Para determinar o sistema de movimentação dos módulos fotovoltaicos, é necessário levantar informações das características que influenciam diretamente nesse processo e que tornem a automatização viável, sendo ela eficiente e baixo custo e consumo de energia.

#### 3.2.1 Graus de Liberdade

Os módulos solares que possuem uma automatização da captação de raios solares podem possuir um ou dois graus de liberdade, sendo um com ajuste em relação ao norte

geográfico (ângulo azimutal) e outro em relação à altitude solar, ou seja, com um grau de liberdade é possível rastrear o sol ao longo do dia e com um grau adicional é possível fazer o rastreamento ao longo do ano. A Figura 13 ilustra um sistema de rastreamento solar com dois graus de liberdade.



**Figura 13** - Módulo solar com dois graus de liberdade de rastreamento

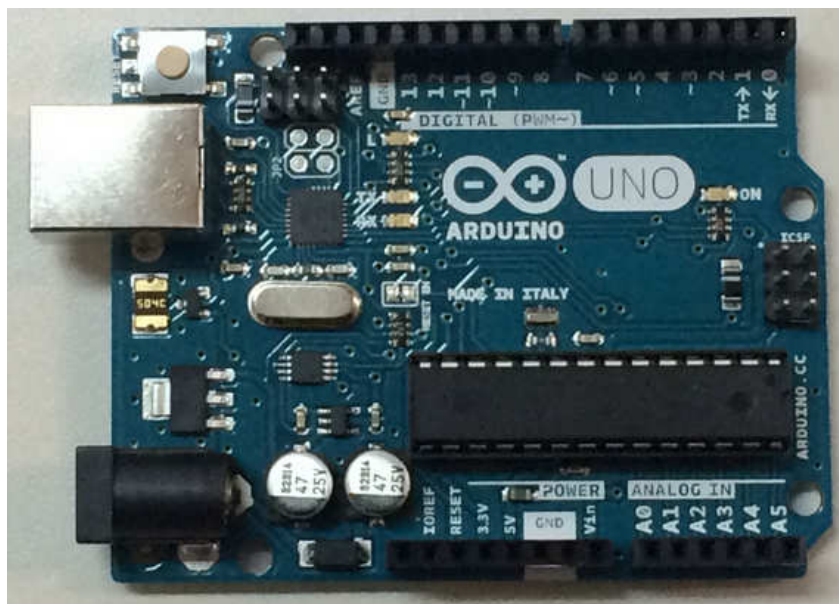
**Fonte:** Aton Tecnosol (2015)

### 3.2.2 Controlador

Uma vez a trajetória do sol traçada sendo assim possível determinar as variações do ângulo de incidência, é possível controlar o ângulo dos módulos fotovoltaicos em malha aberta sem a necessidade de sensores. O controle pode ser feito a partir de um circuito microcontrolado, utilizando um PIC ou um Arduíno que é de fácil programação. A programação se limitaria a enviar um sinal de saída para um motor em tempos pré-determinados correspondentes ao tempo da mudança do ângulo de incidência solar. Em função de o controlador necessitar apenas de pulsos em intervalos programados, a maior parte do tempo o circuito de controle estaria no modo *sleep* o que faz ter um baixo consumo de energia. Para a programação do controlador utiliza-se um RTC (*Real Time Clock*) onde é possível ativar os pulsos programando horas, dias, meses e anos o que faz ficar inoperante quando não há a necessidade de enviar um sinal na saída. Essa programação é possível fazer em função do levantamento feito sobre o tempo em que o sol leva para mudar o ângulo e de quantos graus é essa variação, com isso o ganho que a placa obtém em termos de eficiência energética quando seu ângulo acompanha a trajetória do sol não se perde uma vez que a



alimentação do circuito controlador é muito baixa. A Figura 14 mostra um modelo de placa do arduino uno bastante utilizado em programações de circuitos de controle.



**Figura 14 -** Arduino Uno  
**Fonte:** O autor

### 3.2.3 Acionamento do Motor de Passo

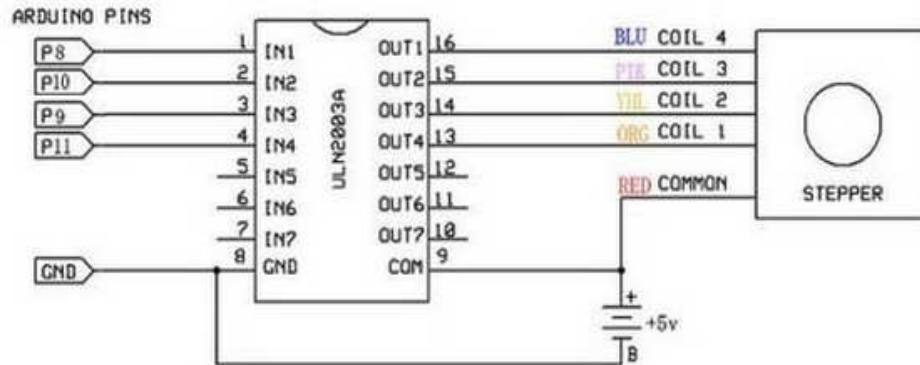
A movimentação do módulo fotovoltaico será feita, através de um motor de passo que será acionado pelo controlador. Existem duas possibilidades de acionamento do motor, uma de forma contínua onde o motor estaria ligado constantemente e outra de forma discreta onde o motor seria acionado apenas em períodos pré-determinados, porém visando um baixo consumo de energia, o acionamento de forma discreta faz com que o motor consuma um nível muito baixo de energia não fazendo com que o sistema de geração de energia sofra perdas.

Uma das vantagens mais significativas de um motor de passo é a sua capacidade de ser controlado com precisão num sistema de malha aberta. Controle de malha aberta significa que nenhuma informação de *feedback* sobre a posição é necessária. Este tipo de controle elimina a necessidade de caros sistemas de detecção, tais como codificadores ópticos. Sua posição é conhecida simplesmente através do controle dos impulsos de entrada. Também é muito confiável, pois não existem escovas de contato no motor. Por conseguinte, a vida útil do motor depende simplesmente da vida do seu mancal.

A maneira mais simples de fazer interface com um motor de passo unipolar com Arduino é a utilização do *chip* ULN2003A. O ULN2003A contém sete transistores *Darlington* e é como se houvesse sete transistores TIP120 tudo em um pacote. O ULN2003A



suporta até 500 mA por canal e tem uma queda de tensão interna de cerca de 1V quando ligado. Ele também contém diodos para atenuação de transitório de tensão durante a condução de cargas indutivas. Para controlar o motor de passo precisa-se aplicar tensão a cada um a das bobinas em uma sequência específica. A Figura 15 a seguir mostra a ligação do Arduino para o motor de passu utilizando um *chip* ULN2003A.



**Figura 15** - Ligação do Arduino para o Motor de Passo  
**Fonte:** NADIEL (2014)

Comercialmente é possível comprar o *kit* contendo a placa do arduíno juntamente com o motor de passo como mostra a Figura 16.



**Figura 16:** Kit Arduino e motor  
**Fonte:** NADIEL (2014)

### 3.3 GERAÇÃO DE ENERGIA

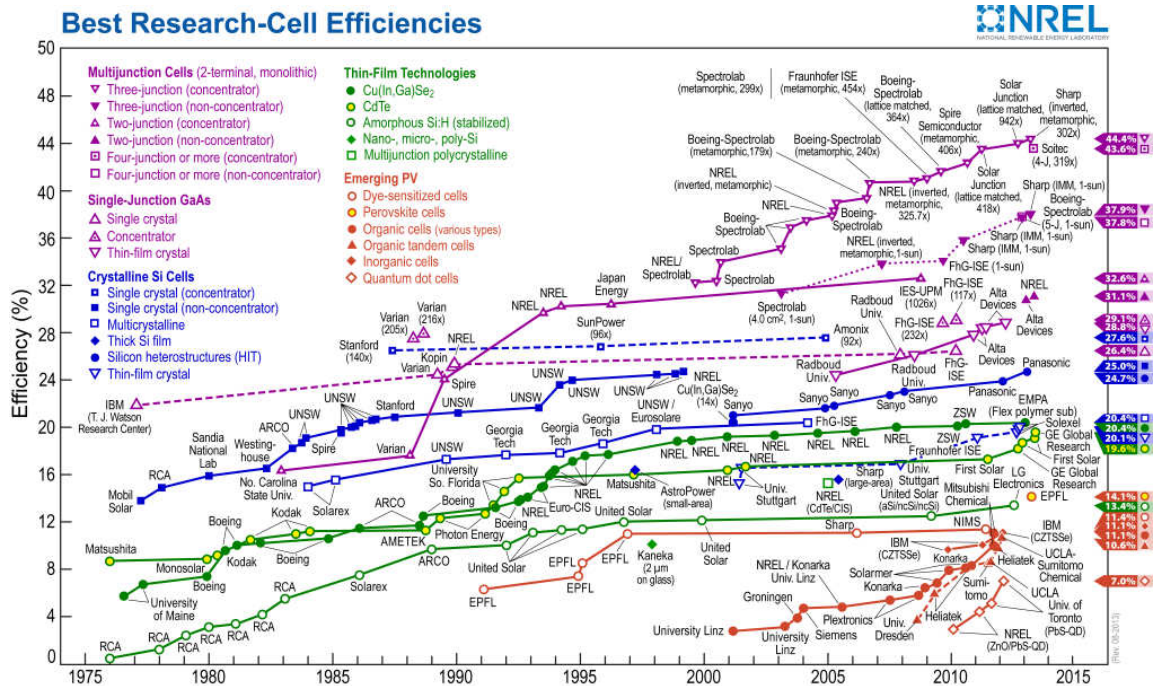
Pensando na geração de energia que um sistema fotovoltaico, um item importante para uma eficiência energética é a escolha da placa fotovoltaica, pois existem hoje diferentes tipos de painéis solares para uso em empresas, residências e usinas de energia solar.

A eficiência energética da placa fotovoltaica esta associada à porcentagem de energia do sol que atinge a superfície do painel fotovoltaico e é transformada em energia elétrica para o nosso consumo. Outros fatores também estão relacionados à eficiência da placa como:

- Maior potência por metro quadrado o seu sistema vai gerar;
- Menor é o painel para a mesma produção de energia;
- Tenha um funcionamento o mais próximo de um gerador ideal, não sendo afetados por temperatura e variações climáticas.

#### 3.3.1 Painel Fotovoltaico

Pensando em eficiência energética, custo e outros fatores relacionados à geração de energia, as placas produzidas a partir de silício (Si) são bastante viáveis para um projeto de geração de energia fotovoltaica. Segundo o Portal Solar (2015) cerca de 80% dos painéis fotovoltaicos no mundo hoje são baseados em alguma variação de silício. Em 2014, cerca de 85% de todos os sistemas de energia solar fotovoltaica instalados em casas e empresas no mundo todo utilizaram alguma tecnologia baseada em silício (Si). A Figura 17, mostra uma relação da eficiência energética de diferentes tipos de materiais utilizados em placas fotovoltaicas. As placas feitas através de silício obtém uma eficiência menor apenas das placas feitas a partir células de multijunção as quais não são utilizadas em sistemas residenciais. As células fotovoltaicas orgânicas (OPV) embora também possuam maior eficiência energética do que as placas de silício, não são comercialmente bastante utilizadas, pois hoje são poucas as empresas que conseguiram levar a produção de células fotovoltaicas (OPV) para uma escala industrial. No Brasil existe a CSEM Brasil, em Belo Horizonte, que está desenvolvendo esta produção com tecnologia principalmente suíça.



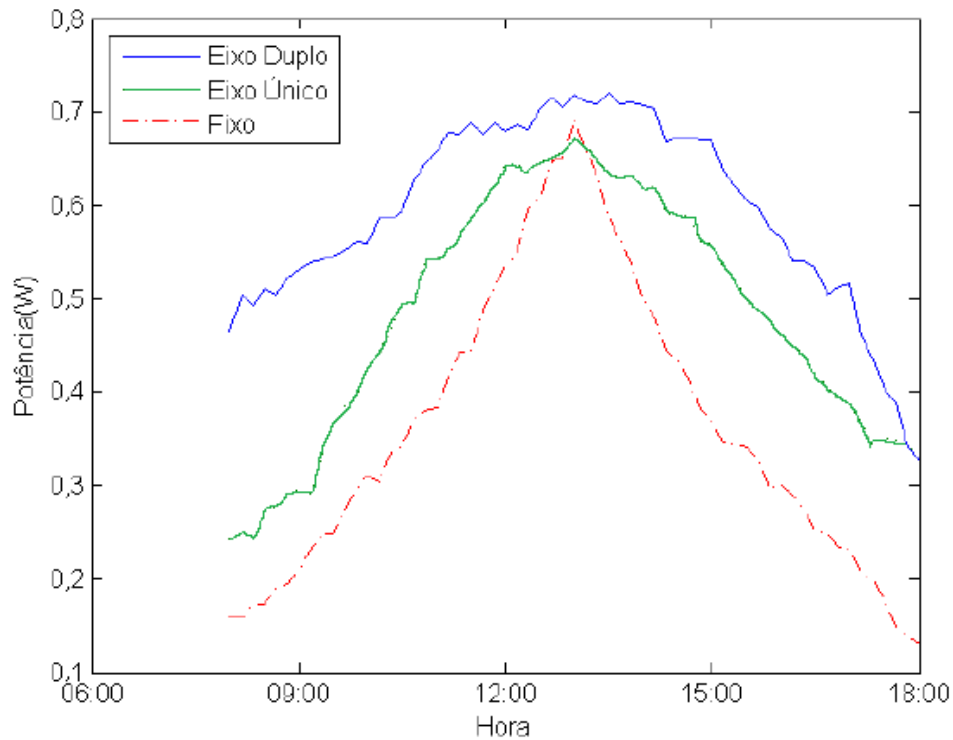
**Figura 17 - Eficiência das células solares**  
**Fonte: NREL (2015)**

### 3.3.2 Eficiência Energética

Para analisar a viabilidade da automatização do sistema de captação energia solar, é necessário comparar a eficiência energética entre um sistema fixo, com um grau de liberdade e outro com dois graus de liberdade. Uma placa com um grau de liberdade rastreia o sol mudando seu ângulo em função do dia, ou seja, muda o ângulo durante o dia acompanhando o sol quando nasce até o pôr do sol. Com dois graus de liberdade, a placa pode acompanhar a trajetória solar durante as diferentes posições do dia como também a cada estação do ano, mudando assim tanto o ângulo da altitude solar como o ângulo azimutal.

O sistema de controle é o mesmo tanto para um quanto para dois graus de liberdade, pois como se trata de apenas o envio de sinais elétricos em tempos pré-determinados, a mudança seria apenas no tempo de envio de sinal elétrico de um grau de liberdade para outro.

Para tomar como base o ganho de um sistema para outro, é possível observar um estudo feito da automatização desse sistema onde foi mensurada a potência das placas fotovoltaicas instaladas de forma fixa e graus de liberdades diferentes. A Figura 18 mostra a eficiência de cada uma.



**Figura 18** - Comparação de eficiência  
**Fonte:** TREVELIN (2014)

Embora essa comparação tenha sido feita coletando os valores de potência entregue somente durante o período de um dia, o sistema utilizando dois graus de liberdade se mostra eficiente obtendo um ganho de quase 40% da potência entregue em um sistema fixo. Segundo Trevelin (2014) a potência consumida pelo circuito controlador e pelo motor é inferior a 15% da potência recebida, o que não influencia no ganho do sistema.

Levando em consideração que o sistema proposto não teria a necessidade da utilização de sensores, apenas de um controle para mandar sinais para o motor, a potência consumida seria menor ainda, pois a corrente elétrica consumida seria na faixa de micro Ampère ( $\mu A$ ) o que faria a potência entregue pela placa ter uma perda quase que insignificante em função do circuito controlador e do acionamento do motor.

### 3.3.3 Inversor solar

Independentemente se o sistema de geração de energia através da captação por placas fotovoltaicas é feito com as placas fixas ou com variação do ângulo, o sistema deve conter um inversor solar que é o coração do seu sistema de energia solar fotovoltaica. O inversor tem como objetivo converter a energia elétrica gerada pelos painéis, de corrente contínua (CC)

para corrente alternada (CA) e também funciona como um sistema de segurança do sistema e medir a energia produzida pelos painéis solares.

Em residências, o inversor solar é tipicamente instalado perto do quadro de luz, em um local abrigado do sol, do calor e da água. O tipo de inversor solar mais utilizado é conhecido como "*inversor grid tie*", esses são os inversores utilizados para conectar o sistema fotovoltaico de energia solar na rede elétrica. A potência (kW) necessária para esse tipo de inversor depende da demanda da potência das placas fotovoltaicas instaladas no sistema de geração de energia, mas é importante também observar se o projeto prevê o aumento de demanda, pois se existir essa previsão o inversor deve ser dimensionado para que suporte o aumento da demanda. A expressão *grid-tie* em português significa: conectado á rede. O inversor *grid-tie* é aquele inversor usado para conectar um sistema fotovoltaico sem baterias na rede da sua residência ou empresa, eles são projetados para desligar rapidamente da rede elétrica caso ela venha a cair. A Figura 19 mostra o inversor *grid-tie* (Portal Solar, 2015).



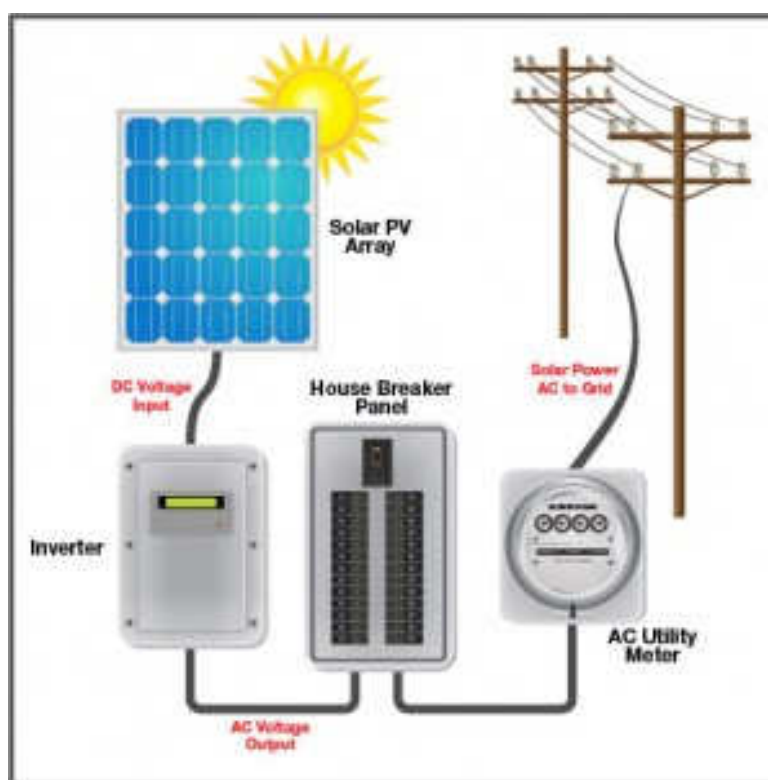
**Figura 19** - Inversor grid-tie

**Fonte:** Energia Pura (2015)

Quanto à instalação dos inversores, eles devem ser fixados a uma parede, ou então, em uma estrutura especificamente construída para isso, em um local arejado e que facilite a manutenção e controle. A caixa de conexão com DPS e chaves AC e CC, deve ser instalada próxima ao inversor. Em alguns países exige-se que a chave para desconexão esteja acessível

ao operador da distribuidora de energia para que este possa desligá-la se necessário, como medida complementar de segurança.

A integração do sistema de geração de energia fotovoltaica com o sistema da rede elétrica fornecida pela concessionária de energia é feita em paralelo. Muitas vezes a energia gerada através do sistema fotovoltaico que não é consumida, é devolvida para rede elétrica que gera créditos em forma de desconto na fatura de energia. A Figura 20 mostra o esquema de ligação do sistema fotovoltaico e da concessionária de energia ligada na rede elétrica residencial.



**Figura 20** - Esquema de ligação do sistema de energia  
**Fonte:** Alternate Energy Company (2015)

### 3.4 PROTÓTIPO DE FUNCIONAMENTO

Embora a proposta não tenha como objetivo a concepção do projeto, foi montado protótipos de diferentes blocos do sistema para testa-los individualmente e assim verificar a viabilidade de sua concepção, verificando possíveis defeitos e melhorias a serem feitas.



### 3.4.1 Variação do ângulo das placas

Primeiramente no dia 11/08/15 com uma temperatura de 25°C sem interferências de nuvens, foram colocadas duas placas fotovoltaicas lado a lado durante um período de 6 horas, uma das placas ficou instalada de modo fixo em um ângulo de 25° em relação ao norte geográfico e a outra placa foi instalada de modo que a cada 1 hora seu ângulo era modificado acompanhando a trajetória do sol. Essa experiência foi feita para demonstrar somente a variação do ângulo das placas fotovoltaicas ao longo do dia.

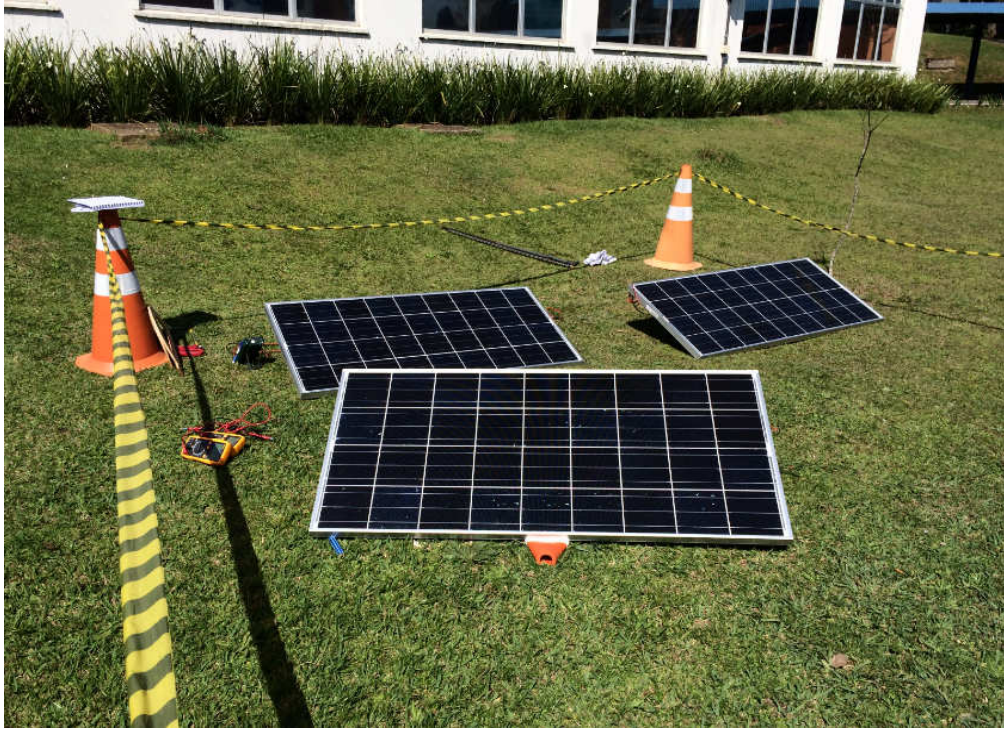
Esse experimento mostra que um controle discreto se torna viável uma vez que o posicionamento do sol não muda de forma acelerada o que necessitaria de um controle contínuo. As Figuras 21,22, 23, 24 e 25 mostram as diferentes posições das PVs nos períodos de teste. As informações técnicas das PVs utilizadas podem ser analisadas em seu *datasheet* que se encontra do Anexo A.



**Figura 21** - Posicionamento do Sol 09:50h

**Fonte:** O autor





**Figura 22 - Posicionamento do Sol 10:50h**  
**Fonte: O autor**



**Figura 23 - Posicionamento do Sol 11:50h**  
**Fonte: O autor**





**Figura 24 - Posicionamento do Sol 12:50h**  
**Fonte: O autor**



**Figura 25 - Posicionamento do Sol 13:50h**  
**Fonte: O autor**

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo proposto apresenta-se eficiente na geração de energia, pois como apresentado anteriormente é possível obter um ganho na geração de energia, quando muda-se o ângulo de captação de raios solares em uma placa fotovoltaica. Apesar de haver um circuito acoplado à placa, o consumo de energia é irrelevante, pois sua alimentação gira em torno de  $\mu\text{A}$  ficando inoperante a maior parte do tempo. O motor também tem um consumo baixo, pois receberá um pulso apenas em tempos pré-determinados também ficando inoperante a maior parte do tempo.

Em relação aos materiais adicionais que o sistema proposto necessita obter para sua implantação, se inclui basicamente uma placa que faça o controle do sistema enviando sinais elétricos para o motor, podendo essa placa ser um Arduíno Uno ou um PIC e também um motor de passo que receba os sinais provenientes da placa. Se tratando de um sistema com dois graus de liberdade seriam necessários dois motores de passo, um para cada grau de liberdade. Também seria necessário todo um sistema mecânico que estaria acoplado no motor e na PV para que a mesma pudesse girar. Todo esse material adicional poderia ter um custo adicional entre 6 e 7% do valor de instalação de um sistema de placas fixas, o que se paga ao longo dos anos em função do ganho em eficiência energética proveniente desse sistema. A tabela 3 mostra uma prospecção de custo com a implementação desse sistema. No *kit* fotovoltaico está incluso painéis fotovoltaicos, inversor solar (*grid-tie*), estrutura de fixação, cabeamento especial para corrente contínua e conectores especiais. O *kit* fotovoltaico é utilizado independente se o sistema de geração de energia é fixo ou móvel com o controle do ângulo das placas. Para o sistema com o controle de automatização são inclusos o *kit* Arduíno, o motor de passo e as estruturas metálicas interligando o eixo do motor nas placas para que possam girá-las mudando assim seu ângulo. Considerando os dois graus de liberdade do controle proposto, a tabela mostra os valores de dois *kits* de Arduíno, dois motores de passo e duas barras de aço de três metros para a estrutura metálica.

**Tabela 2** - Custo de sistema automático de rastreamento solar

Material	Valor	
<i>kit</i> Fotovoltaico	R\$	12.500,00
<i>kit</i> Arduíno	R\$	196,00
Motor de passo	R\$	480,00
Estrutura metálica	R\$	98,00

**Fonte:** O autor

Analisando os sistemas de captação automática da luz solar nas placas fotovoltaicas já existentes, o modelo proposto apresenta características diferentes, podendo ter maior eficiência na potência entregue pelas placas. Os modelos utilizados como base utilizavam diferentes tipos de sensores para captar as mudanças da trajetória solar, com isso a automatização do circuito pode acarretar em um maior consumo de energia, ou seja, descontando a energia produzida com a energia consumida pelo circuito de controle a eficiência pode não ter um ganho tão expressivo.

O mapeamento da trajetória solar mostra a variação do ângulo de movimentação ao longo do ano, isso mostra que uma placa fotovoltaica não terá a mesma captação de raios solares em todos os períodos no ano. Com esse mapeamento foi possível estabelecer em quais épocas acontece essa variação, isso se torna uma peça chave para o desenvolvimento de um circuito de controle para a alteração no ângulo da PV.

Dentro das vantagens e desvantagens de um sistema de captação de energia solar acompanhando a trajetória do sol pode se citar como uma das principais vantagens o ganho da eficiência energética, pois estudos mostram que um sistema automático de rastreamento solar independente composto por um ou dois graus de liberdade têm um ganho em relação a um sistema fixo, como se pode analisar na Tabela 4.

**Tabela 3** - Percentual do aumento sobre a potência média

	<b>Eixo Único</b>	<b>Fixo</b>
<b>Eixo Duplo</b>	<b>18,8%</b>	<b>39,2%</b>
<b>Eixo Único</b>	-	<b>25%</b>

**Fonte:** Trevelin (2014)

A desvantagem que esse projeto pode apresentar são possíveis manutenções que tanto o sistema eletrônico, quanto o sistema mecânico tenham a necessidade de realizar. Dependendo das condições climáticas, a placa fotovoltaica pode realizar o controle do ângulo, mas não ter um aumento na geração de energia devido a falta de incidência solar, ou devido a dispersão da luz em virtude de nuvens, sendo assim o ângulo ajustado pelo circuito de controle, pode não ser o ideal para captar a maior incidência de raios solares sobre a placa fotovoltaica.

## 5 CONCLUSÃO

Dentro dos projetos existentes e a proposta apresentada, é possível obter diversas soluções que ajudam os sistemas de energia fotovoltaica a aumentarem sua eficiência energética. Algumas soluções apresentam sistemas contínuos que são em sua maioria mais complexos buscando a mínima variação do sol, mas tem como desvantagem maior consumo de energia pela sua placa de controle, outras de forma mais simples com controle discreto, onde o acionamento do motor é em períodos pré-determinados, mas que consomem menos energia tendo um ganho maior.

O custo da implementação desse projeto depende da demanda de energia a ser gerada, pois esse fator implica na quantidade de placas fotovoltaicas utilizadas e suas dimensões. Porém para o sistema de automatização, uma única placa de controle pode controlar diversas placas fotovoltaicas e um único motor pode girar mais de uma placa dependendo de seu peso, ou seja, é possível implantar um sistema mecânico em que as placas sejam interligadas no eixo do mesmo motor, não sendo necessária a utilização de diversos motores, reduzindo assim custos para sua implantação.

A proposta de automatização da captação de raios solares para sistemas fotovoltaicos apresentou as características, os métodos, os materiais e dados que mostram como é possível realizar a implantação desse sistema e assim ter uma melhor eficiência energética em todos os períodos do dia e do ano.

Como encaminhamento futuro essa proposta visa a concepção do projeto, apontando melhorias dentro dos sistemas já existentes e colocando em prática, a proposta de automatização da captação de raios solares visando, um aumento em sua eficiência energética em relação aos sistemas de geração de energia fotovoltaicas com placas fixas.

## REFERÊNCIAS

- ALMAKS, Laser Solution. **Laser Scribing**. Disponível em <http://www.almakslasersolution.com/laser-scribing/> - Acesso em 12/06/15
- ALTERNATE ENERGY COMPANY. **Grid-Tie Systems Residential or Commercial** Disponível em: <http://alternateenergycompany.com/grid-tie-systems> - Acesso em 03/08/15
- ATON, Tecnosol. **Suportes com rastreador móvel automático**. Disponível em <http://www.atontecnosol.com.br/metalurgicaSuporte/movelAutomatico> - Acesso em 22/07/15
- CSEM, Brasil. **Eletrônica Orgânica**. Disponível em: [http://www.csembrasil.com.br/p/electronica\\_organica](http://www.csembrasil.com.br/p/electronica_organica) – Acesso em 12/06/15
- DE ALMEIDA SANTOS, Vinicius Puga. Motor de Passo. Disponível em: <http://minilink.es/3fgz> – Acesso em 01/09/15
- DEL TORO, Vicent. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1994.
- DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. **Solar Engineering of Thermal processes**. New York etc.: Wiley, 1980.
- ELECTRÓNICA. **Instalação Sistemas Solares Fotovoltaicos**. Disponível em: <http://www.electronica-pt.com/instalacao-sistema-fotovoltaico> - Acesso 24/06/15
- ELETRÔNICA DIÁRIA. **Foto Resistor, LDR**. Disponível em: <http://eletronicadiaria.blogspot.com.br/p/foto-resistor-ldr.html> - Acesso em 19/06/15
- ENERGIA PURA. **Inversor Grid Tie SMA 10 kW Sunny Tripower**. Disponível em: <https://www.energiapura.com/content/inversor-grid-tie-sma-10-kw-sunny-tripower> - Acesso em 03/08/15
- ENERGY INFORMATIVE, the homeowner`s guide to solar panels. **Best Thin Film Solar Panels – Amorphous, Cadmium Telluride or CIGS?** Disponível em <http://energyinformative.org/best-thin-film-solar-panels-amorphous-cadmium-telluride-cigs/> - Acesso em 12/06/15
- INEO, Instituto Nacional de Eletrônica Orgânica. **Criada primeira célula solar inteiramente de carbono**. Disponível em: [http://www.ifsc.usp.br/~ineo/news/index.php?pos\\_id=212](http://www.ifsc.usp.br/~ineo/news/index.php?pos_id=212) – Acesso em 12/06/15
- LAMBERTS, Roberto. **Orientação e Diagrama Solar**. Disponível em: <http://goo.gl/IN8jXb> - Acesso 08/04/15
- MILEA. P.L., OLTU. O, DRAGULINESCU. M, DASCALU. M. **Optimizing Solar Panel Energetic Efficiency Using an Automatic Tracking Microdetector**.



Electronics, telecommunications and Information Technology Faculty "Politehnica"  
University of Bucharest Iuliu Maniu 1-3, Bucharest ROMANIA, 2007

MOLGARO. R.J. **Introdução a Energia Solar Fotovoltaica**. Disponível em:  
<http://pt.slideshare.net/RobsonJosuMolgaro/introduo-a-energia-solar-fotovoltaica> - Acessado em 08/02/2015.

NADIEL, Comercio. **Controlando um Motor de Passo 5v com Arduino**. Disponível em:  
<http://www.nadielcomercio.com.br/blog/2014/05/13/controlando-um-motor-de-passo-5v-com-arduino/> - Acesso 24/07/15

NREL. **NREL Sets New World Record with Two-Junction Solar Cell**. Disponível em:  
<http://energyinformative.org/nrel-efficiency-record-two-junction-solar-cell> - Acesso em 27/07/15

PORTAL SOLAR. **Tipos de painel solar fotovoltaico**. Disponível em:  
<http://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html> - Acesso em 27/07/15

RIBEIRO. S. C, PRADO. P. P. L, GONÇALVES. J. B. **Projeto e Desenvolvimento de um Rastreador Solar para Painéis Fotovoltaicos**. Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. 2012.

ROSÁRIO, João Mauricio. **Princípio de Mecatrônica**. 6ª Ed São Paulo: Editora Pearson Education do Brasil, 2011.

SIEMENS. **Motores de Corrente Contínua**. 2006

TOPSKY, Eletronics Technology(HK)Co, LTD. Disponível em  
<http://www.topsky-tech.com/156mm-monocrystalline-solar-cell-supplier.html> - Acesso em 11/06/15

TORRES, Gabriel. **Eletrônica para Autodidatas, Estudantes e Técnicos**. Rio de Janeiro Nova Terra Editora e Distribuidora LTDA.

TREVELIN, Felipe Camargo. **Estudo Comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos**. 2014

VILLALVA, Marcelo G.; GAZOLI, Jonas R. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**. 1 ed. São Paulo: Editora Érica, 2012

VILLULLAS, H. Mercedes; TICIANELLI, Edson A.; GONZALEZ, Ernesto R. **Células a combustível: energia limpa a partir de fontes renováveis**. **Redes**, 2011.

VIRIDIAN, Ecotecnologia. **Energia Solar Fotovoltaica** disponível em  
<http://www.viridian.com.br/tecnologia/energia+solar+fotovoltaica/4> - Acesso em 10/06/15

ANEXOS

ANEXO A – DATASHEET PLACA FOTOVOLTAICA MODELO KC 130 TM



THE NEW VALUE FRONTIER



# KC130TM

HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL PHOTOVOLTAIC MODULE



LISTED

## HIGHLIGHTS OF KYOCERA PHOTOVOLTAIC MODULES

Kyocera's advanced cell processing technology and automated production facilities produce a highly efficient multicrystal photovoltaic module. The conversion efficiency of the Kyocera solar cell is over 16%. These cells are encapsulated between a tempered glass cover and a pottant with back sheet to provide efficient protection from the severest environmental conditions. The entire laminate is installed in an anodized aluminum frame to provide structural strength and ease of installation.



## APPLICATIONS

- Microwave / Radio repeater stations
- Electrification of villages in remote areas
- Medical facilities in rural areas
- Power source for summer vacation homes
- Emergency communication systems
- Water quality and environmental data monitoring systems
- Navigation lighthouse, and ocean buoys
- Pumping systems for irrigation, rural water supplies and livestock watering
- Aviation obstruction lights
- Cathodic protection systems
- Desalination systems
- Railroad signals
- etc.

## QUALIFICATIONS

- MODULE : UL 1703 certified  
Hazardous Locations Class I, Div 2, Groups A, B, C and D
- FACTORY : ISO9001 and ISO 14001

## QUALITY ASSURANCE

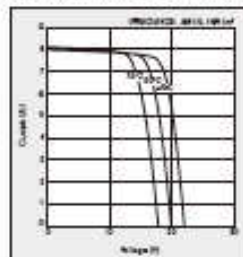
Kyocera multicrystal photovoltaic modules have passed the following tests.  
 ● Thermal cycling test ● Thermal shock test ● Thermal / Freezing and high humidity cycling test ● Electrical isolation test  
 ● Hail impact test ● Mechanical, wind and twist loading test ● Salt mist test ● Light and water-exposure test ● Field exposure test

## LIMITED WARRANTY

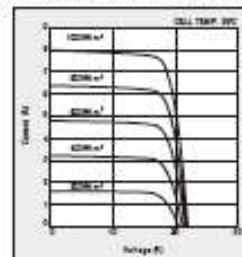
※ 1 year limited warranty on material and workmanship  
 ※ 20 years limited warranty on power output: For detail, please refer to "category IV" in Warranty issued by Kyocera  
 (Long term output warranty shall warrant if PV Module(s) exhibits power output of less than 90% of the original minimum rated power specified at the time of sale within 10 years and less than 80% within 20 years after the date of sale to the Customer. The power output values shall be those measured under Kyocera's standard measurement conditions. Regarding the warranty conditions in detail, please refer to Warranty issued by Kyocera)

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC130TM at various cell temperatures



Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KC130TM at various irradiance levels

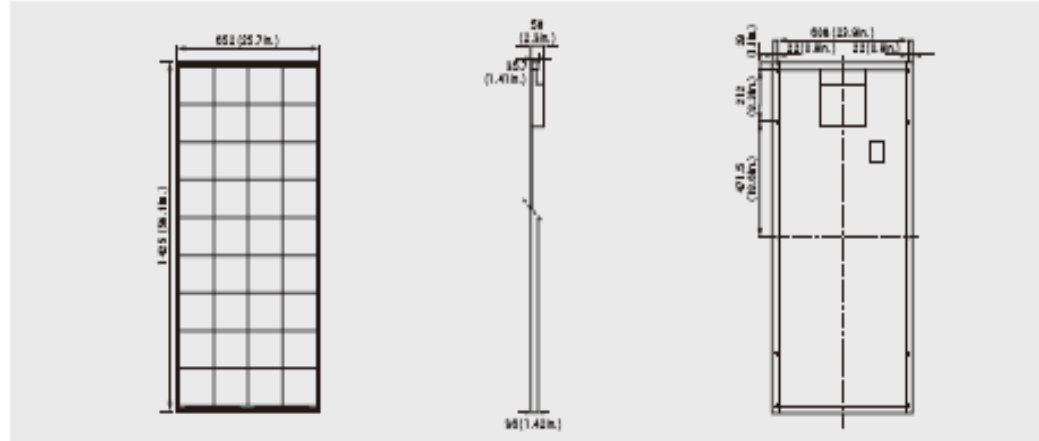


## SPECIFICATIONS

KC130TM

## Physical Specifications

Unit: mm (in.)



## Specifications

## Electrical Performance under Standard Test Conditions (\*STC)

Maximum Power (P <sub>max</sub> )	130W (+10%/ -5%)
Maximum Power Voltage (V <sub>mpp</sub> )	17.6V
Maximum Power Current (I <sub>mpp</sub> )	7.39A
Open Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )	21.9V
Short Circuit Current (I <sub>sc</sub> )	8.03A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of V <sub>oc</sub>	-8.21 × 10 <sup>-4</sup> V/°C
Temperature Coefficient of I <sub>sc</sub>	3.18 × 10 <sup>-3</sup> A/°C

\*STC: Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, AM1.5 spectrum, module temperature 25°CElectrical Performance at 800W/m<sup>2</sup>, NOCT, AM1.5

Maximum Power (P <sub>max</sub> )	92W
Maximum Power Voltage (V <sub>mpp</sub> )	15.6V
Maximum Power Current (I <sub>mpp</sub> )	5.94A
Open Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> )	19.9V
Short Circuit Current (I <sub>sc</sub> )	6.47A

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature): 45°C

## Cells

Number per Module	36
-------------------	----

## Module Characteristics

Length × Width × Depth	1451mm(57.1in.) × 652mm(25.7in.) × 98mm(3.9in.)
Weight	11.9kg(26.6lbs.)

## Junction Box Characteristics

Length × Width × Depth	170mm(6.7in.) × 42mm(1.7in.) × 24mm(0.9in.)
IP Code	IP65

## Reduction of Efficiency under Low Irradiance

Reduction	4.3%
-----------	------

Reduction of efficiency from an irradiance of 1000W/m<sup>2</sup> to 200W/m<sup>2</sup> (module temperature 25°C)

Please contact our office for further information



## KYOCERA Corporation

## KYOCERA Corporation Headquarters

CORPORATE SOLAR ENERGY DIVISION  
6 Takada Tsubono-cho  
Fushimi-ku, Kyoto  
612-8601, Japan  
TEL: (81)75-606-2476 FAX: (81)75-606-2475  
http://www.kyocera.com

## ● KYOCERA Solar, Inc.

7912 East Acorn Drive  
Scottsdale, AZ 85260, USA  
TEL: (1)480-948-9003 or (800)222-9580 FAX: (1)480-480-4821  
http://www.kyocerasolar.com

## ● KYOCERA Solar do Brasil Ltda.

Av. Galgand 991, Loja A  
22700-000, Recreio dos Búzios, Rio de Janeiro, Brazil  
TEL: (55)21-2437-9526 FAX: (55)21-2437-2928  
http://www.kyocerasolar.com.br

## ● KYOCERA Solar Pty Ltd.

Level 3, 6-10 Talavera Road, North Ryde  
N.S.W. 2113, Australia  
TEL: (61)2-9870-9288 FAX: (61)2-9880-9599  
http://www.kyocerasolar.com.au

## ● KYOCERA Fineceramics GmbH

Fritz Müller strasse 107, D-79730 Eschingen, Germany  
TEL: (49)711-99994-317 FAX: (49)711-99994-950  
http://www.kyocerasolar.de

## ● KYOCERA Asia Pacific Pte. Ltd.

298 Tiong Bahru Road, #12-02/05  
Central Plaza, Singapore 168730  
TEL: (65)6271-0600 FAX: (65)6271-0600

## ● KYOCERA Asia Pacific Ltd.

Room 801-802, Tower 1 South Seas Centre, 75 Mody Road,  
Telok Ayer Stair, Kowloon, Hong Kong  
TEL: (852)2-7337168 FAX: (852)2-7344604

## ● KYOCERA Asia Pacific Ltd. Taipei Office

10 Fl., No.66, Nanjing West Road, Taipei, Taiwan  
TEL: (886)2-2555-3609 FAX: (886)2-2559-4121

## ● KYOCERA(Tianjin) Sales &amp; Trading Corporation

19F, Tower C HeQiao Building 8A, Guanghua Rd.,  
Chao Yang District, Beijing 100026, China  
TEL: (86)10-6583-2270 FAX: (86)10-6583-2250