



**Universidade Federal do Pampa**  
**Campus Bagé**

**Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente**

**Emanuel Antunes Vieira**

**PROTÓTIPO DE RASTREADOR SOLAR EM DUPLO EIXO**

**Bagé**  
**2013**

**Emanuel Antunes Vieira**

## **PROTÓTIPO DE RASTREADOR SOLAR EM DUPLO EIXO**

Trabalho de conclusão apresentado como exigência para obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente da Universidade Federal do Pampa.

Orientador: Prof. Dr. Allan Seeber

Co - Orientador: Dr. Luis Eduardo A. Vieira

**Bagé  
2013**

658p Vieira , Emanuel  
PROTÓTIPO DE RASTREADOR SOLAR EM DUPLO EIXO /  
Emanuel Vieira .  
91 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)--  
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIAS  
RENOVÁVEIS E AMBIENTE, 2013.

"Orientação: Allan Seeber ".

1. Engenharia de Energia . I. Título.

**Emanuel Antunes Vieira**

**PROTÓTIPO DE RASTREADOR SOLAR EM DUPLO EIXO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente pela Universidade Federal do Pampa.

Orientador: Prof. Dr. Allan Seeber  
Co-orientador: Dr. Luis Eduardo Antunes Vieira

Data: 13 de maio de 2013.

Resultado: \_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Universidade Federal do Pampa  
Prof. Dr. Allan Seeber

---

Universidade Federal do pampa  
Prof. Dr. Marcelo Romero

---

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Dr. Luis Eduardo Antunes Vieira

Dedico esse trabalho aos meus pais Catulino Antunes Vieira e Ieda Antunes Vieira (in memoriam), pelos incentivos durante esta caminhada.

*“Somente após a última árvore ser cortada;  
Somente após o último rio ser envenenado;  
Somente após o último peixe ser pescado;  
Somente então o homem descobrirá que  
dinheiro não pode ser comido”.*  
*(Chefe Seattle)*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço às inúmeras pessoas que, no decorrer do tempo em que estive cursando engenharia, foram presença motivadora e incentivadora, elucidando as minhas dúvidas e apoiando as minhas decisões; agradeço aos professores, aos técnicos dos laboratórios, sempre atenciosos e prestativos no desempenho de suas tarefas.

Quero agradecer aos amigos que fiz durante esta árdua caminhada; entre todos, posso citar os mais presentes: Dorado, Mainardi, Luciano, Pedro, Ronaldo e as colegas Cecília e Silvieli que estudaram muito ao meu lado.

Aos familiares, que por muitos anos me aguentaram, surtando nos finais de período, agradeço a todos, de modo muito especial a minha irmã Raquel, que me incentivou a terminar o curso; ao meu irmão Luis Eduardo que me ajudou muito na graduação. Também agradeço àqueles que se tornaram familiares, como o meu cunhado Adilson, que por muitas vezes me incentivou a prosseguir nos estudos; e a minha cunhada Lígia.

Ao meu pai, Catulino, que desempenha papel fundamental na minha vida, agradeço a paciência, o companheirismo e o grande incentivo para que eu concluísse essa importante etapa de minha formação. Ao meu primo José Adilson pela ajuda prestada em um momento de grande importância.

A minha namorada Tamy Dotto, que está do meu lado me incentivando neste momento decisivo, me trazendo alegrias nas horas mais tensas.

E por fim, mas não menos importantes, não posso esquecer-me dos sobrinhos, Arthur, Heitor, Ísis e Ícaro, pelos momentos de descontração e alegria compartilhados entre um surto e outro.

## RESUMO

A escassez de recursos energéticos é um dos temas mais preocupantes nos dias de hoje. Com uma sociedade cada vez mais tecnológica, a demanda por energia é cada vez maior; e a substituição das energias poluentes por energias limpas é uma necessidade que precisamos suprir. Entre as tecnologias que despontam na corrida por energia menos poluente, a energia fotovoltaica é uma fonte promissora; contudo, ela possui uma eficiência baixa necessitando a realização de pesquisas que melhorem a eficiência dos sistemas de conversão. Uma dessas áreas de pesquisa abrange os rastreadores solares. Eles conseguem, através da movimentação do sistema de conversão, o aumento da energia captada pelos módulos fotovoltaicos. Neste trabalho, foi desenvolvido um sistema de rastreamento solar de duplo eixo que, através de sensores ópticos, monitora o caminho aparente do sol. Esse sistema tem por princípio localizar a fonte que está emitindo a maior intensidade luminosa; e assim, movimentar o sistema de suporte das células fotovoltaicas, utilizando servomotores.

**Palavras-chave:** Rastreador Solar, Sensor óptico



## **ABSTRACT**

The shortage of energy resources is one of the most troubling issues nowadays. With an increasingly technological society, the demand for energy is increasing, and the replacement of polluting energy for clean energy is a necessity that we must supply. Among the technologies that emerge in the race for cleaner energy, photovoltaic energy is a promising source, yet it has a low efficiency need to conduct research to improve the efficiency of conversion. One of these research areas cover solar trackers. They can, by moving conversion system, the increased energy captured by the photovoltaic modules. In this work, we developed a tracking system that dual-axis solar behind optical sensors, monitors the apparent path of the sun. This system is beginning to locate the source that is emitting the highest light intensity, and thus move the support system of photovoltaic cells using servomotors.

Keywords: Sun Tracker, Optical sensor

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação da distância da Terra-Sol.....	5
Figura 2 - Plano Elíptico.....	6
Figura 3 - Iluminação da Terra durante o Solstício e Equinócios .....	7
Figura 4 - Data do UTC dos Solstícios e Equinócios 2002 a 2017 .....	8
Figura 5 - Esboço de rastreador solar tipo passivo .....	10
Figura 6 – Adaptador: Seguidor solar de dois eixos móveis.....	11
Figura 7 - Representação dos Ângulos.....	12
Figura 8 - Inclinação solar de um módulo de conversão solar para a cidade de Bagé-RS , para os dias de passagem das estações do ano .....	15
Figura 9 - Estrutura de movimentação .....	16
Figura 10 - Tipos de tecnologia das células fotovoltaicas .....	18
Figura 11 - Célula fotovoltaica silício monocristalino .....	18
Figura 12 - Célula fotovoltaica silício policristalino .....	19
Figura 13 - Célula fotovoltaica silício amorfo.....	19
Figura 14 - Diagrama de bandas de energia de um semicondutor .....	20
Figura 15 – Curva característica célula irradiada .....	24
Figura 16 - Composição de um gerador fotovoltaico.....	27
Figura 17 – Ligação dos módulos (serie ou paralelo).....	28
Figura 18 – Célula solar com ponto quente.....	29
Figura 19 – Esquemático de um módulo sem diodo de derivação .....	29
Figura 20 – Esquemático de um módulo com diodo de derivação .....	30
Figura 21 - Diodo de derivação ( bypass) .....	30
Figura 22 - LDR .....	31
Figura 23 - Comparação sinal Digital & Analógico .....	32
Figura 24 - Exemplo de um sinal analógico .....	32
Figura 25 - Simbologia LDR.....	34
Figura 26 - Resposta do LDR a luminosidade.....	35
Figura 27 - Divisor de tensão .....	35
Figura 28 - Divisor de tensão com LDR .....	36
Figura 29 - Divisor de tensão com LDR , com LDR na base .....	37
Figura 30 - Esquemático em corte longitudinal do sensor óptico .....	38
Figura 31 - Vista superior e lateral do sensor óptico .....	39
Figura 32 - Sensor montado para o protótipo.....	39
Figura 33 - Resultado do rastreamento usando o matlab dos sensores LDR's .....	40
Figura 34 - Componente do servomotor.....	41
Figura 35 - Servomotor .....	42
Figura 36 - PWM - Servos .....	43

Figura 37 - Estrutura de movimentação .....	44
Figura 38 - Sensor de temperatura .....	45
Figura 39 - Variação da resistencia com a temperatura .....	45
Figura 40 - Esquemático do sensor de temperatura .....	46
Figura 41 – Arduino Uno Rev3.....	48
Figura 42 - Gráfico Corrente & Tensão com variação da irradiação.....	50
Figura 43 - Gráfico Potência & Tensão com variação da irradiação.....	50
Figura 44 - Gráfico Corrente & Tensão para o arranjo de células fotovoltaicas do projeto..	51
Figura 45 - Gráfico Potência & Tensão para o arranjo de células fotovoltaicas do projeto..	51
Figura 46 - Gráfico das potência medidas para o dia 21/04/2013 .....	53
Figura 47 - Rastreador Solar.....	53
Figura 48 - Gráfico dados coletados LDR's sistema de rastreo solar .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Rendimento dos módulos fotovoltaicos.....	19
Tabela 2 - Características arduino uno .....	47
Tabela 3 - Dados coletados dia 21/04/2013.....	59
Tabela 4 - Custos do protótipo.....	52

## LISTA DE SIMBOLOS

$E_o$	Distância Sol- Terra	[UA]
$D$	Dia do ano no calendário Juliano	[dias]
$G$	Irradiância global	[W.h.m <sup>-2</sup> ]
$\iota$	Ângulo de incidência	[°]
$\gamma_s$	Altitude Solar	[°]
$\alpha_s$	Azimute Solar	[°]
$\alpha$	Azimute do painel	[°]
$\beta$	Ângulo de inclinação	[°]
$L$	Latitude	[°]
$\delta$	Declinação Solar	[°]
$h_s$	Ângulo Horário	[°]
$H$	Tempo cronológico	[horas]
$\nu$	Frequência da radiação	[Hz]
$H$	Constante de Planck [ 6,626x10 <sup>-34</sup> ]	[J.s]
$c$	Velocidade da luz [ 3x10 <sup>9</sup> ]	[m.s <sup>-1</sup> ]
$\lambda$	Comprimento de onda	[µm]
$\lambda_c$	Comprimento de onda de corte	[µm]
$K$	Constante de Boltzman [1.38x10 <sup>-23</sup> ]	[J.K <sup>-1</sup> ]
$Q$	Valor absoluto da carga de elétron [1,6x10 <sup>-19</sup> ]	[C]
$T$	Temperatura absoluta	[K]
$I_o$	Corrente inversa de saturação	[A]
$I_D$	Corrente atravessa o diodo	[A]
$I_L$	Corrente gerada pela exposição à radiação solar ou luz artificial	[A]
$I_{CC}$	Corrente de Curto Circuito Corrente	[A]
$I_{mp}$	Corrente de máxima potência	[A]

$V_{CA}$	Tensão em circuito aberto	[V]
$V_{mp}$	Tensão no ponto de máxima potência	[V]
$m$	Fator de idealidade do diodo	
$V$	Diferença de potencial aos terminais do diodo	[V]
$V_T$	Potencial térmico	[W]
$P_{mp}$	Potência no ponto de máxima	[W]
$\eta_{ref}$	Rendimento célula fotovoltaica	[%]
$FF$	Fator forma célula fotovoltaica	[-]
$A$	Área da superfície da célula fotovoltaica	[m <sup>2</sup> ]
$T_{cel}$	Temperatura da célula fotovoltaica	[°C]
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	[°C]
$Lux$	Luminosidade	[Lux]
$C$	Constante que depende do processo de fabricação do LDR	[-]
$a$	Constante que depende do processo de fabricação do LDR	[-]
$V_r$	Tensão do LDR	[V]
$V_t$	Tensão da fonte	[V]
$R_1$	Resistor	[Ω]
$R_2$	Resistor	[Ω]

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Motivação.....	2
1.3 Objetivos geral e específico.....	3
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
3 RASTREADOR SOLAR.....	9
3.1 Seguidor com dois eixos móveis.....	11
3.2 Definição dos ângulos.....	12
4 O PROTÓTIPO.....	16
4.1 Descrição dos componentes.....	17
4.1.1 Painéis fotovoltaicos.....	17
4.1.1.1 Determinação da corrente, tensão e potencia de uma célula fotovoltaica.....	23
4.1.1.2 Parâmetros de referência.....	25
4.1.1.3 Gerador fotovoltaico.....	26
4.1.2 Sistema óptico.....	30
4.1.3 Servomotores.....	40
4.1.4 Sensor de temperatura.....	45
4.1.5 Arduino.....	47
5 RESULTADOS.....	49
6 CONCLUSÃO.....	56
7 REFERÊNCIAS.....	57
8 ANEXO.....	59
8.1 Anexo A.....	59
8.2 Anexo B.....	63
8.3 Anexo C.....	64
8.4 Anexo D.....	65

## 1 INTRODUÇÃO

A humanidade vem requerendo cada vez mais energia para a sua sobrevivência. Nesse contexto, cabe à engenharia descobrir como produzir essa energia da forma mais eficiente e sustentável possível.

Toda e qualquer tecnologia já sofreu, ou sofrerá, algum tipo de aprimoramento; até as tecnologias que estão na vanguarda estão em um processo de melhoria. Também as tecnologias que convertem a energia solar estão suscetíveis a estas mudanças.

Uma das possíveis melhorias diz respeito a como efetuar, de forma mais eficiente, a captação da energia solar incidente a uma superfície. Um dos artifícios que podem ser utilizados nessa tarefa são os rastreadores solares, que possuem a característica de manter mecanicamente o sistema de conversão de energia solar perpendicular aos raios solares.

### 1.1 Contextualização

A escassez de recursos energéticos é um dos temas mais preocupantes nos dias de hoje. Como a nossa sociedade, cada vez mais tecnológica, requer uma demanda cada vez maior de energia, a substituição das energias poluentes por energias limpas é uma necessidade que precisamos suprir.

A maior parte da energia utilizada pelas residências brasileiras atualmente provém das hidrelétricas: cerca de 84% (IBGE, 2010). A participação das fontes renováveis na matriz energética nacional está ocorrendo de forma gradativa e são de extrema importância tanto para a economia quanto para o ambiente.

Dessa forma, abre-se a possibilidade de um grande mercado a ser explorado, uma vez que o sistema de geração atual aproxima-se de seu limite de produção, fato este agravado pela dificuldade de se obter licenças ambientais para a construção de novas usinas hidrelétricas, pois a construção dos reservatórios afeta diretamente os ecossistemas dos rios, além do elevado custo de construção de suas estruturas.

Nesse sentido, a energia solar apresenta-se como uma das alternativas a ser



considerada ecologicamente viável por ser renovável, e pelo baixo impacto ambiental.

Embora já exista uma infinidade de pequenos aproveitamentos da energia solar no Brasil, isso ainda é pouco significativo, diante do grande potencial existente. Isso se deve a vários fatores. Alguns dos grandes problemas para o aumento na utilização de projetos de energia solar são: altos custos dos equipamentos que realizam essa função; a falta de informação por parte dos consumidores; o baixo número de análises quantitativas qualificadas e a quase ausência de uma política de incentivo adequada de incentivo para as empresas do setor, como por exemplo, a redução de impostos.

Além disso, estudos mostram que o Brasil é, anualmente, 'inundado' com uma quantidade de energia equivalente a quinze trilhões de MWh (CONPET, 2010). Isso é cinquenta mil vezes mais do que o consumo nacional de energia elétrica registrado no Brasil em 1999, ano recorde no consumo.

Sendo assim, este trabalho visa apresentar um método que busca melhorar, significativamente, o aproveitamento desta importante fonte de energia.

## **1.2 Motivação**

Durante a graduação, um dos temas que mais me empolgou foi a utilização da energia solar, pois dela derivam praticamente todas as outras formas, como energia eólica, biocombustíveis, maré motriz.

Há um grande potencial a ser explorado quando se fala em utilização da energia solar; no entanto, é uma tecnologia que necessita de aperfeiçoamento, como melhorias na eficiência dos painéis, sistemas de rastreamento mais baratos, melhoramentos nos conversores e sistema de armazenamento.

Essa busca por melhorias me motivou a escolher esse tema como trabalho de conclusão de curso.

### 1.3 Objetivos Geral e Específico

O objetivo geral deste trabalho foi o de desenvolver, genericamente, um seguidor solar de dois eixos para um pequeno sistema fotovoltaico. Para isso, será desenvolvido um programa de cálculo necessário para saber o posicionamento aparente do sol para cada momento do dia. Para determinar o posicionamento, foi desenvolvido, como protótipo, um sistema mecânico e eletrônico que possibilitasse a orientação.

O protótipo construído possui as características:

- Seguimento em dois eixos, eixo azimutal e zênite, com a capacidade de orientar os módulos fotovoltaicos na direção do sol ao longo do dia;
- Sensor de posicionamento do módulo constituído de quatro sensores de luminosidade, designados LDR (*Light Dependent Resistor*);
  - Na parte mecânica, utilizam-se dois servos motores para efetuar o posicionamento;
  - Na parte estrutural, o seguidor é montado em alumínio e, acrílico;
  - O controle é efetuado por um microcontrolador ATmega328.

O objetivo específico foi verificar se o sistema de posicionamento executa com precisão a sua função e qual o grau de melhoria na geração de energia, utilizando o sistema de posicionamento.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

O sol é a principal fonte de energia da terra do qual derivam todas as demais formas de energia necessárias à vida. Essa energia é emitida pelo Sol na forma de radiação eletromagnética a uma taxa altíssima e de maneira praticamente ininterrupta.

Segundo Stine e Geyer (2001), se fosse possível coletar a energia emitida correspondente a 10 hectares da superfície solar, toda a demanda energética atual, seria suprida. Assim, pelo fato da Terra rotacionar sobre seu eixo polar, qualquer dispositivo de coleta colocado sobre a superfície terrestre, receberá a energia radiante emitida pelo Sol apenas durante a metade de cada dia.

Outro fator menos previsível diz respeito às condições da atmosfera que envolve a Terra e que interfere diretamente na quantidade de energia que pode atingir a superfície. Em situações bastante favoráveis, a redução da energia incidente na superfície é de ordem de 30%. De acordo com Stine e Geyer (2001), se comparado com a energia no topo da atmosfera terrestre, entretanto, condições desfavoráveis podem levar a situações de diversos dias seguidos com uma quantidade mínima de irradiação solar que atinge a superfície da Terra.

Nesse contexto, a quantidade de energia solar que atinge a Terra é chamada de irradiação solar e sua unidade usual é Watts por metro quadrado ( $W.m^{-2}$ ). A irradiação solar é, na realidade, uma medida da potência instantânea que atinge uma determinada área de Terra, e esta potência pode ser variável ao longo do tempo.

Seu valor máximo é usado no projeto de sistemas solares para determinação da taxa máxima de entrada de energia no sistema; mas, para o dimensionamento do sistema de conversão, deve utilizar a mínima irradiação solar para certo período, como parâmetro de referência quando se trata do dimensionamento, pois se trata do pior cenário possível; caso o sistema inclua armazenamento de energia, necessita-se saber a variação da irradiação solar com o tempo de modo a otimizar-se o projeto do sistema de coleta e armazenamento.

Outro parâmetro necessário para projeto e dimensionamento de sistemas da captação de energia solar é conhecer como acontece a radiação solar ou irradiação

Esse parâmetro indica a quantidade de energia que chega ao dispositivo de coleta durante um período de tempo, que pode ser hora, dia, semana, mês, ano, etc. Na verdade, a medida de radiação solar é feita a partir de integração dos dados de insolação durante um

intervalo de tempo. A unidade para radiação solar é Joule por metro quadrado ( $J.m^{-2}$ ), ou usualmente, Watt-hora por metro quadrado ( $W.h.m^{-2}$ ).

Nesse sentido, para possibilitar de maneira eficiente a conversão de energia solar, tanto na forma fotovoltaica como na forma solar térmica, tornar-se indispensável conhecer a posição da Terra em relação ao Sol, tomando a Terra como referência. Busca-se assim, conhecer, para qualquer instante de tempo, a posição aparente do Sol em relação a um local na superfície da Terra. Uma vez conhecida esta orientação, pode-se, dessa maneira, manter o sistema de conversão solar perpendicularmente orientado aos raios solares extraíndo assim o máximo de energia do sistema de conversão.

A Terra descreve uma órbita elíptica em torno do Sol. Esse movimento translacional tem duração de aproximadamente 365,242 dias. Essa órbita é conhecida como “Plano Elíptico”, sendo que a órbita da Terra em seu ponto de máxima distância do Sol (no Afélio) está a uma distância de  $1,52 \times 10^{11} m$ , e tem uma distância mínima (no Periélio) de  $1,47 \times 10^{11} m$ . A Figura 1 a seguir demonstra o comportamento dessa distância Terra-Sol, para um ano em unidades astronômicas ( $1UA = 1,46 \times 10^{11} m$ ).

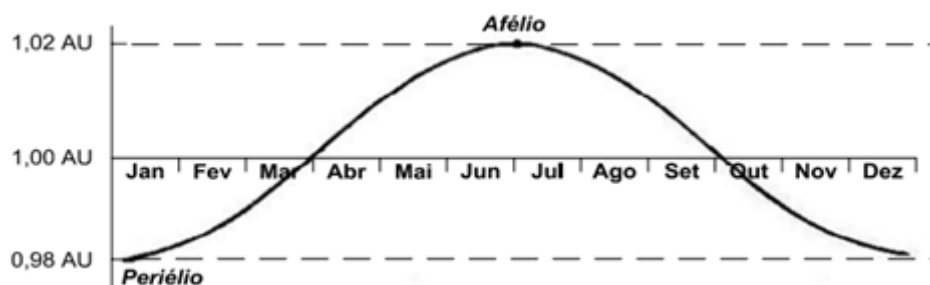
Essa distância é dada pela aplicação da equação 1 onde:

$$Eo = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{2 * \pi * D}{365}\right) \quad (1)$$

Onde :

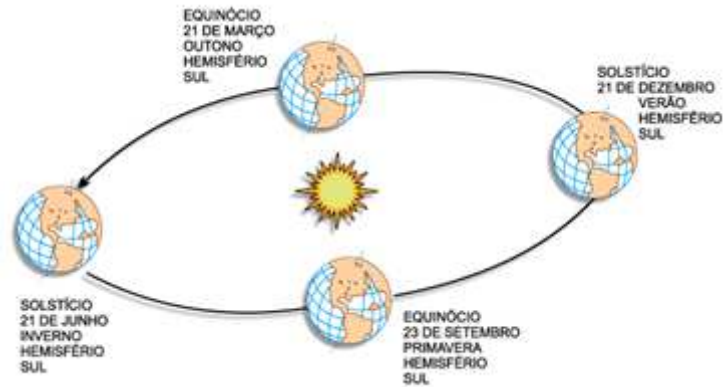
$Eo = \text{distância Sol - Terra [UA]}$

$D = \text{Dia do ano no calendario juliano [dias]}$



**Figura 1- Variação da distância da Terra-Sol**  
**Fonte: (<http://www.powerfromthesun.net/index.html>).**

A Figura 2 ilustra o plano elíptico da trajetória do planeta Terra em torno do Sol e apresenta as estações do ano para o hemisfério Sul.



**Figura 2 - Plano Elíptico**

Fonte: (<http://www.powerfromthesun.net/index.html>).

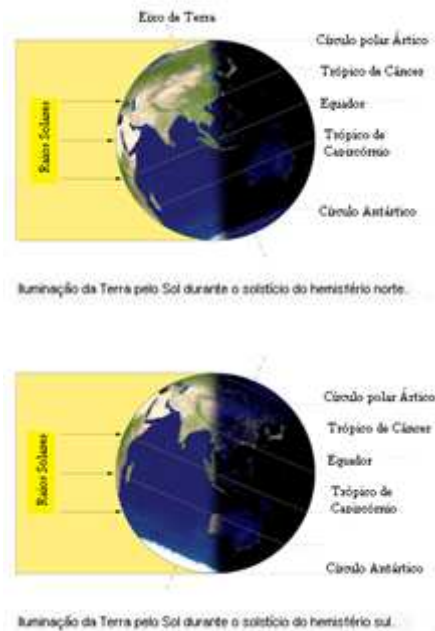
O solstício é o momento em que o Sol, durante seu movimento aparente, atinge a maior declinação em latitude, medida a partir da linha do equador. Esse fenômeno ocorre duas vezes por ano: em dezembro e em junho. O dia e hora exatos variam de um ano para outro.

Quando ocorre no verão significa que a duração do dia é a mais longa do ano. Analogamente, quando ocorre no inverno, significa que a duração da noite é a mais longa do ano.

Já no hemisfério sul, o fenômeno é simétrico: o solstício de verão ocorre em dezembro e o solstício de inverno ocorre em junho. Os momentos exatos dos solstícios, que também marcam as mudanças de estação, são obtidos por cálculos de astronomia.

Devido à órbita elíptica da Terra, as datas nas quais ocorrem os solstícios não dividem o ano em um número igual de dias. Isso ocorre porque, quando a Terra está mais próxima do Sol (Periélio), viaja mais rapidamente do que quando está mais longe (Afélio).

Os trópicos de Câncer e Capricórnio são definidos em função dos solstícios. No solstício de verão do hemisfério sul, os raios solares incidem perpendicularmente à superfície da Terra no Trópico de Capricórnio. No solstício de verão do hemisfério norte, ocorre o mesmo fenômeno no Trópico de Câncer.



**Figura 3 - Iluminação da Terra durante o Solstício e Equinócios**  
**Fonte: (<http://apod.nasa.gov/apod/ap100923.html>).**

Na linha do equador, a duração dos dias é fixa ao longo das estações do ano com 12 horas de luz e 12 horas de noite (ver cálculo da duração do dia para latitude de  $0^\circ$ ). Desse modo, os solstícios nessa linha não podem ser obtidos através de dias ou noites mais longas e somente podem ser observados através do dia em que o Sol atinge a menor elevação no meio-dia local, podendo o azimute dessa elevação do Sol estar orientado para o norte (solstício de verão no hemisfério norte) ou para o sul (solstício de verão no hemisfério sul). Na linha do equador não há como dizer se um solstício é de verão ou de inverno, uma vez que demarcam a separação dos hemisférios norte e sul da Terra.

As datas dos equinócios variam de um ano para o outro, devido aos anos trópicos (o período entre dois equinócios de março) não terem exatamente 365 dias, fazendo com que a hora precisa do equinócio varie ao longo de um período de dezoito horas, que não se encaixa necessariamente no mesmo dia.

O ano trópico é um pouco menor que 365 dias e 6 horas; assim, num ano comum, tendo 365 dias e, portanto, mais curto, a hora do equinócio é cerca de seis horas mais tarde que no ano anterior. Ao longo de cada sequência de três anos comuns, as datas tendem a

se adiantar um pouco menos de seis horas a cada ano.

Ano	Equinócio Março		Solstício Junho		Equinócio Setembro		Solstício Dezembro	
	Dia	Hora	Dia	Hora	Dia	Hora	Dia	Hora
2002	20	19:16	21	13:24	23	04:55	22	01:14
2003	21	01:00	21	19:10	23	10:47	22	07:04
2004	20	06:49	21	00:57	22	16:30	21	12:42
2005	20	12:33	21	06:46	22	22:23	21	18:35
2006	20	18:26	21	12:26	23	04:03	22	00:22
2007	21	00:07	21	18:06	23	09:51	22	06:08
2008	20	05:48	20	23:59	22	15:44	21	12:04
2009	20	11:44	21	05:45	22	21:18	21	17:47
2010	20	17:32	21	11:28	23	03:09	21	23:38
2011	20	23:21	21	17:16	23	09:04	22	05:30
2012	20	05:14	20	23:09	22	14:49	21	11:11
2013	20	11:02	21	05:04	22	20:44	21	17:11
2014	20	16:57	21	10:51	23	02:29	21	23:03
2015	20	22:45	21	16:38	23	08:20	22	04:48
2016	20	04:30	20	22:34	22	14:21	21	10:44
2017	20	10:28	21	04:24	22	20:02	21	16:28

**Figura 4 - Data do UTC dos Solstícios e Equinócios 2002 à 2017**  
**Fonte: (<http://apod.nasa.gov/apod/ap100923.html>).**

Além da trajetória que descreve em torno do sol, a Terra também tem o movimento rotacional sobre seu eixo polar, inclinando-se  $23,45^\circ$ , em ciclos de aproximadamente 24 horas. Essa rotação da Terra sobre seu eixo produz os dias e as noites e a inclinação deste eixo em relação ao plano elíptico produz as estações do ano. Esta variação tem relativa importância para o posicionamento de um sistema de conversão solar. A data referente à Figura 2 refere-se ao ano de 2011, mas pode ter uma variação de até dois dias dependendo do ano de interesse.

### 3. RASTREADOR SOLAR

Um rastreador solar tem por objetivo orientar um painel ou arranjo de painéis fotovoltaicos, concentradores de energia ou coletor solar, buscando deixar o sistema de energia solar sempre voltado para que a incidência de raios solares perpendiculares à superfície do sistema de energia solar, seja máxima. Sendo assim, o rendimento do sistema energético será aumentado, devido ao maior tempo de incidência da componente direta da irradiação.

Usualmente são considerados dois métodos de posicionamento de sistemas de conversão solar: o método matemático e o método de posicionamento por sensores. O método matemático de posicionamento leva em consideração o caminho aparente do Sol a partir dos parâmetros de declividade terrestre, latitude, ângulo horário, dia do ano (no calendário Juliano), etc. O método de posicionamento por sensores utiliza sensores ópticos e sensores que determinam a diferença de temperatura. Para posicionar o sistema, são usados onde o grau de precisão é relevante, mas para a maioria de aplicações de sistema de posicionamento ativo.

O seguimento se dá por arranjos de sensores ópticos; esses sensores são suficientes para determinar a posição solar, através de sistemas eletrônicos. No entanto, o problema de basear o sistema de orientação solar em sensores ópticos é o fato da ocorrência de nuvens que cobrem o sol por alguns instantes e neste período o sistema é levado a se reposicionar, sem ter necessidade, elevando um consumo de energia para o acionamento dos motores.

Basicamente há dois tipos de rastreadores, ativos ou passivos, quanto à metodologia de rastreamento:

- Rastreadores do tipo ativo - Estes tipos de rastreadores possuem um sistema de controle que consiste em sensores de luz, controlador e atuador (um ou mais motores elétricos). Os sensores servem para detectar a posição do Sol em relação à Terra e o final do dia. O microcontrolador processa os sinais vindos dos sensores, e de acordo com a lógica de controle ou de programação, envia o sinal para o atuador, que geralmente é um motor elétrico cc.

Um dos problemas desse tipo de rastreador é o retorno à posição inicial do dia, com a face do módulo virada para o leste, pois no final do dia, obviamente, o módulo não mais está recebendo energia do Sol para ligar o motor no sentido contrário.



Uma das alternativas é o uso de baterias recarregáveis; dessa forma, durante o dia, a bateria é carregada e, no fim do dia, o motor utiliza sua energia para retornar o módulo. "A alternativa proposta é o uso de um módulo extra, ligado diretamente no motor elétrico, fixado perpendicularmente ao módulo coletor da energia solar, inclinado 20° a leste" (LIBRA; POULEK, 1998). "Assim, quando o Sol nasce, sua luz incide neste módulo extra, gerando energia suficiente para ligar o motor e girar a montagem para o leste no início do dia ." (BOUDINOV; GEORGIEV; ROTH, 2004);

A alternativa usada neste trabalho foi, a partir dos dados de luminosidade coletados dos sensores LDR's e posição do servo motor que movimenta a estrutura no eixo do zênite, fazendo uma média dos sensores e media tiver valor igual e inferior a cem e a posição do servomotor tiver ultrapassado cento e setenta graus. O sistema reposiciona a estrutura em direção leste (posição do servomotor zenital em zero grau);

- Rastreadores do tipo passivo - O princípio de funcionamento deste tipo de rastreador é baseado na atuação da força da gravidade em dois cilindros existentes nas extremidades leste e oeste da montagem do coletor solar. Esses cilindros contêm um líquido, tal como freon, submetido a uma certa pressão, e são interligados entre si através de um canal que permite a passagem do líquido de um cilindro para o outro.



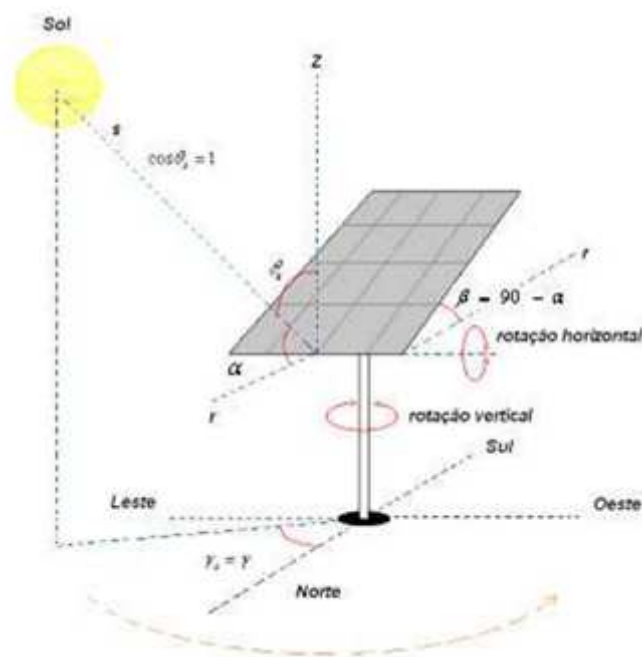
**Figura 5 - Esboço de rastreador solar tipo passivo**  
**Fonte: (LIBRA; POULEK, 1998).**

Quando a luz do Sol bate em um dos cilindros (quando os raios não estão incidindo a um ângulo de 90° no módulo), o líquido nele aquece, aumentando sua pressão e forçando-o a se deslocar para o outro cilindro, causando um deslocamento do centro de massa da montagem, resultando no giro da mesma. Desta forma, o painel solar segue o movimento aparente do Sol. Este tipo de rastreador é mais eficiente quando trabalha a altas temperaturas. (ABOUZEID, 2001).

Duas de suas desvantagens são o distúrbio que pode sofrer com a força do vento e a falta parcial de radiação solar, como em dias nublados e quando o Sol nasce, o módulo está virado para o oeste, acarretando uma diminuição na energia captada diariamente. Seu retorno é forçado pelo aquecimento do tubo do lado oeste, pois quando o Sol nasce sua luz atinge apenas este tubo devido à construção mecânica (CLIFFORD; EASTWOOD, 2004).

### 3.1 Seguidor com dois eixos móveis

O seguidor tem por característica o movimento em dois eixos: tem seu movimento vertical (ELEVAÇÃO) e horizontal (AZIMUTAL), o que proporciona um grande rendimento de conversão do componente direto da radiação solar. Esse tipo de equipamento pode ser usado em montagens de conversão direta, ou em concentradores solares com espelhos ou lentes. A figura 6 ilustra a movimentação dos eixos desse seguidor solar.



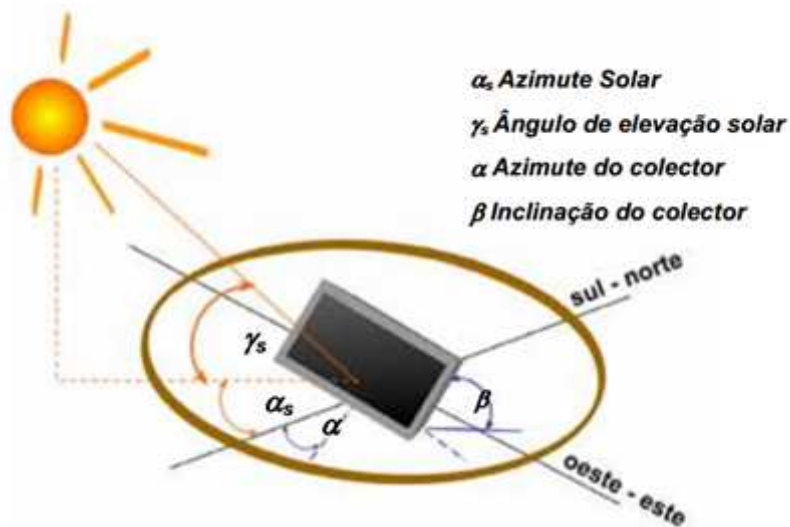
**Figura 6 - Adaptado, Seguidor solar de dois eixos móveis**  
**Fonte: (OLIVEIRA, 2008).**

O movimento é dado por meio de motores elétricos, que são controlados por um microcontrolador. Esse tipo de rastreador utiliza sensor óptico ou térmico, para determinar o posição aparente do Sol.

### 3.2 Definições dos ângulos

A determinação exata da localização do Sol se torna fundamental para o aumento da energia produzida pelas instalações que convertem a energia do Sol em energia útil. Essa localização pode ser descrita por meio de equação; fazendo mão de tais equações, podemos determinar a posição do Sol para qualquer localidade na superfície do globo terrestre em qualquer tempo.

Dessa forma, basta determinar o ângulo de elevação do Sol ( $\gamma_s$ ), e o ângulo azimutal Solar ( $\alpha_s$ ), de acordo com as equações que serão citadas neste capítulo. Na figura 7 estão representados os ângulos de maior importância para efetuar, de forma adequada, o rastreo do caminho do Sol.



**Figura 7- Representação dos Ângulos**  
 Fonte: (OLIVEIRA, 2008).

Este trabalho tem por finalidade a obtenção da minimização da atenuação existente quando os raios do Sol incidente não estão perpendiculares ao plano do sistema de conversão; ou seja, quando o ângulo de incidência solar ( $\iota$ ) não é nulo, o sistema de rastreamento solar controla a variação dos parâmetros: ângulo de elevação solar  $\gamma_s$ , azimute do painel ( $\alpha$ ) e o ângulo de inclinação do painel ( $\beta$ ), com o objetivo de minimizar o

ângulo de incidência ( $\iota$ ) que é a variável que, em função da movimentação aparente do Sol durante o dia, define o quanto o sistema de conversão solar poderá extrair de energia, por influenciar na irradiância útil no painel. A irradiância útil no painel é dada por ( $I_{\mu}$ ):

$$I_{\mu} = G * \cos(\iota) \quad (2)$$

Onde:

$G =$  Irradiancia global

$\iota =$  ângulo de incidencia [°]

Para determinar o ângulo de incidência ( $\iota$ ), é dado pela equação 3 ;

$$\cos(\iota) = \cos(\alpha) * \cos(\alpha_s - \alpha) * \sin(\beta) + \sin(\gamma_s) * \cos(\beta) \quad (3)$$

Onde:

$\iota =$  ângulo de incidencia [°]

$\gamma_s =$  altitude solar [°]

$\alpha_s =$  azimute solar [°]

$\alpha =$  azimute do painel [°]

$\beta =$  ângulo de inclinação do painel [°]

Na determinação do ângulo de altitude Solar, devemos levar em consideração a latitude onde está posicionado o sistema, conversão e a declinação solar, assim como o ângulo horário, como demonstra a equação 4:

$$\sin(\gamma_s) = \sin(L) * \sin(\delta) + \cos(L) * \cos(\delta) * \cos(hs) \quad (4)$$

Onde:

$\gamma_s =$  altitu de solar [°]

$L =$  latitude [°]

$\delta =$  declinação solar [°]

$hs =$  ângulo horário [°]

Na determinação do ângulo de azimute solar, tomamos a equação 4 e a equação 5 que determina o ângulo horário (hs) onde:

$$hs = (H - 12) * 15 \quad (5)$$

Onde :

$H =$  Tempo cronológico [horas]

Considerando que  $hs = 0$  (meio dia);  $hs < 0$  (manhã);  $hs > 0$  (tarde), o valor do ângulo de Azimute solar ( $\alpha_s$ ), é dado pela equação 6:

$$\sin(\alpha_s) = \frac{\cos(\delta) * \sin(hs)}{\cos(\gamma_s)} \quad (6)$$

Onde:

$\alpha_s =$  azimute solar [°]

$\delta =$  declinação solar [°]

$hs =$  ângulo horário [°]

$\gamma_s =$  altitude solar [°]

Na determinação do ângulo de declividade solar ( $\delta$ ), devemos levar em conta o dia do ano em análise de acordo com a equação 7:

$$\delta = 23,45 * \sin\left(\frac{360}{365}(D - 81)\right) \quad (7)$$

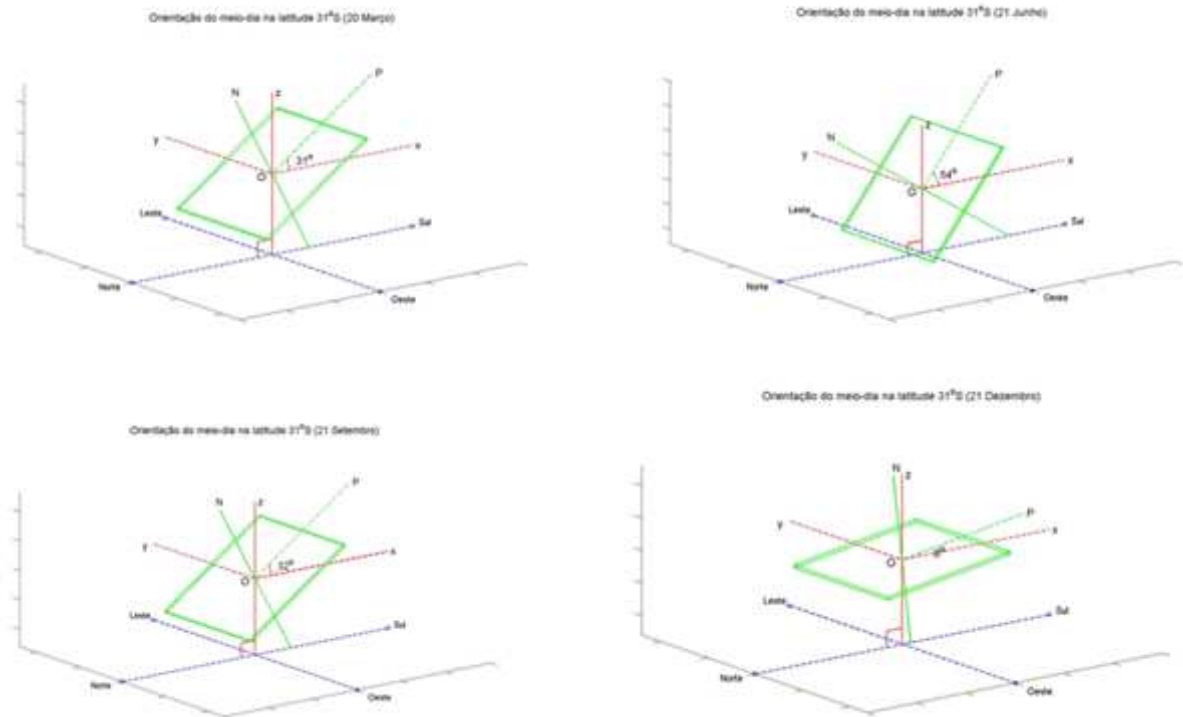
Onde:

$\delta =$  declinação solar

$D =$  dia do ano no calendario juliano [dias]

Se tomarmos a equação 3 e, considerando a situação em que  $\alpha = \alpha_s$  e  $\beta = (90^\circ - \gamma_s)$ , resulta no ângulo de incidência ( $\iota = 0^\circ$ ), condição em que a irradiação é máxima, concluímos que o sistema de conversão solar está orientado de forma eficiente para o Sol. Efetuando os cálculos de posicionamento para as datas de passagem das estações do ano (20 de março, 21 de junho, 22 de setembro e 21 de dezembro) é possível visualizar como a inclinação se comporta durante o ciclo de translação da terra, tomando com referência o meio dia, como

horário padrão.



**Figura 8- Inclinação solar de um módulo de conversão solar, para a cidade de Bagé-RS , para os dias de passagem das estações do ano.  
Fonte: (VIEIRA,E A. 2010).**

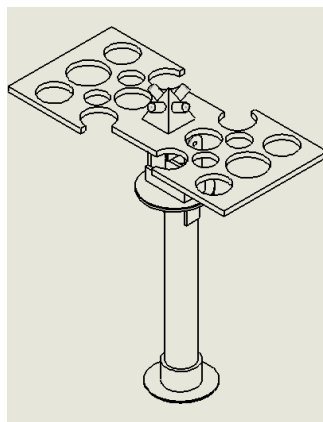
Durante o mesmo horário de medição, há uma variação de 46°, durante o ano, mostrando uma grande variação do ângulo de inclinação do painel, justificando a implementação de um sistema de rastreamento solar com o foco de aumentar a eficiência de um sistema de conversão para uma latitude como a de Bagé, Rio Grande do Sul. Quanto maior for a latitude, maior será a necessidade de um sistema de rastreamento, devido à grande variação azimutal durante o período de análise.

#### 4. O PROTÓTIPO

Neste capítulo, serão analisados os componentes que constituem o protótipo de rastreador solar de dois eixos, assim com as suas devidas funções no projeto, visando à compreensão de seu funcionamento. O elemento responsável pelo rastreio do movimento aparente do Sol durante o dia é o sensor de luminosidade que é formado por quatro sensores LDR posicionados na estrutura do rastreador de modo a formarem as direções de movimentação (direita (LDR2), esquerda (LDR4), superior (LDR1), inferior (LDR3)).

A parte de controle é feita por um microcontrolador ATmega328 que controla o acionamento dos motores. Esses motores, por sua vez, movimentam a estrutura vertical e horizontalmente, conforme a necessidade de orientação, seguindo a lógica de programação efetuada no microcontrolador.

Na parte de programação, foram desenvolvidos dois códigos: um na linguagem de programação C e outro utilizando o programa Matlab. O objetivo dessa programação é o de ler o valor de tensão dos sensores LDR, através das entradas analógicas do microcontrolador arduino uno, comparar os valores e, se necessário, acionar os servos motores no sentido de que reposicionem a estrutura, até que os quatro sensores recebem a mesma intensidade luminosa. A figura 9 é o modelo em SolidWorks do protótipo desenvolvido neste trabalho; no anexo D, consta as dimensões dos componentes que fazem parte deste protótipo.



**Figura 9 - Estrutura de movimentação**  
**Fonte: Autoria própria.**

## 4.1 Descrição dos componentes

Serão descritos os componentes, assim com as suas teorias de funcionamento e os processos de utilização e montagem para a confecção do protótipo de rastreador solar de dois eixos. Na confecção do protótipo foram utilizados:

- Duas (02) Células fotovoltaicas;
- Quatro (04) Sensores LDR;
- Dois (02) Servomotores;
- Um (01) Sensor de temperatura;
- Um (01) Arduino UNO REV 3
- Um (01) Sensor de Tensão
- Um (01) Sensor de Corrente
- Cabos e componentes de ligação

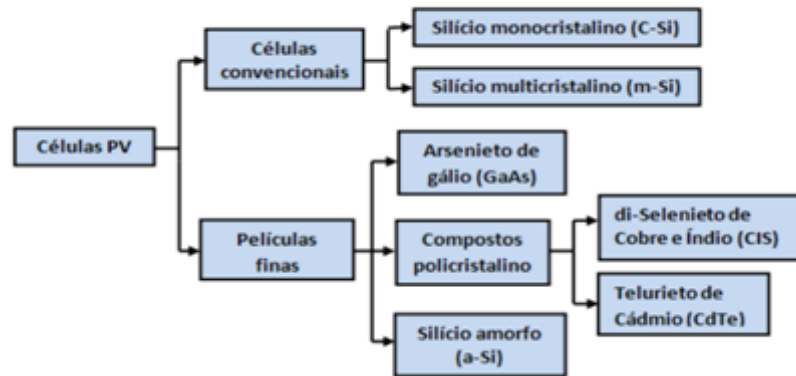
### 4.1.1 Painéis fotovoltaicos

A produção de energia via conversão fotovoltaica leva em conta vários parâmetros como temperatura, irradiação, posição geográfica, processo de fabricação das placas. Os princípios de funcionamento destes dispositivos de conversão são passíveis de modelagem matemática, podendo assim ter uma previsão de quanto o sistema poderá render em termos de eficiência na conversão.

Hoje em dia, existem diferentes tecnologias e materiais que permitem visualizar o efeito fotoelétrico. Em termos de aplicações terrestres, dentre os dispositivos semicondutores utilizados para a produção de células fotovoltaicas, distingue-se em varias categorias consoantes a estrutura do material e processo fabril.

Entre os tipos de painéis fotovoltaicos, os painéis denominados painéis policristalinos, dominam o mercado consumidor. Mas, nos últimos anos e com avanço na tecnologia, painéis que utilizam a tecnologia de película fina têm ganhado espaço no mercado consumidor, mostrando uma tendência de substituição por essa tecnologia, em um futuro próximo, devido ao baixo custo.





**Figura 10 - Tipos de tecnologia das células fotovoltaicas**  
 Fonte: (MAPOTA, 2009).

Hoje, as tecnologias mais utilizadas são células do tipo monocristalino, policristalino e amorfo. Estas tecnologias já se encontram desenvolvidas e em nível comercial, embora seus rendimentos sejam ainda considerados insatisfatórios se comparados com outros meios de produção de energia elétrica como a eólica, por exemplo.

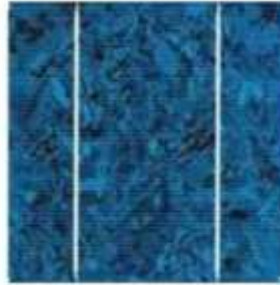
Células tipo silício monocristalino representam a primeira geração de células desenvolvidas em escala comercial. As técnicas utilizadas na sua fabricação são complexas e caras. Devido à exigência da utilização de materiais em estado de pureza elevado, e com estrutura de cristal perfeita, estes aspectos fazem com que a tecnologia seja de maior eficiência na conversão, mas com custo mais elevado na atualidade.



**Figura 11 - Célula fotovoltaica silício monocristalino**  
 Fonte: (MAPOTA, 2009).

Células tipo silício policristalino são constituídas por número muito elevado de microcristais. Como o processo de fabricação é menos rigoroso e, conseqüentemente, mais

barato se comparado com a tecnologia de células de silício monocristalino, possui uma eficiência inferior à tecnologia anteriormente citada.



**Figura 12 - Célula fotovoltaica silício policristalino**  
**Fonte: (MAPOTA, 2009).**

Células tipo silício amorfo – Esta tecnologia diferencia-se das outras por não possuir estrutura cristalina, sendo caracterizada por apresentar películas finas. O processo de fabricação do silício amorfo oferece custo mais baixo de todos os já citados; a desvantagem é o processo citado de menor eficiência.



**Figura 13- Célula fotovoltaica silício Amorfo**  
**Fonte: (MAPOTA, 2009).**

O rendimento típico destes tipos de células fotovoltaicas se encontra na tabela abaixo.

**Tabela 1 - Rendimento dos Módulos Fotovoltaicos**

	Rendimento Típico	Máximo Registrado em aplicações	Rendimento máximo. registrado em Laboratório
Monocristalino	12 - 15%	22,7%	24%
Policristalino	11 - 14%	15,3%	18%
Amorfo	6 - 7%	10,2%	12,7%

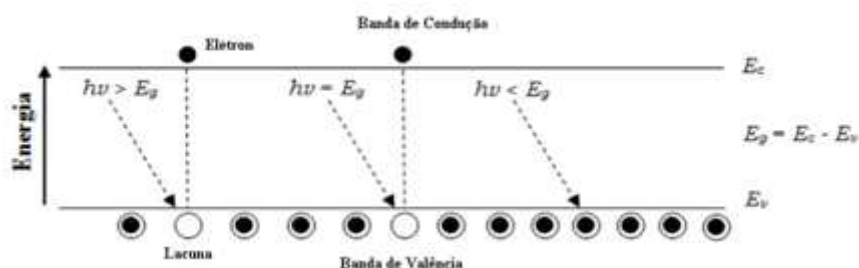
**Fonte: (MAPOTA, 2009).**

Propriedades elétricas dos painéis fotovoltaicos convertem a radiação solar em eletricidade, utilizando propriedade inerente aos semicondutores utilizados na fabricação das células. Estes semicondutores se comportam como isolantes a baixas temperaturas, e como condutores a temperaturas mais elevadas ou na incidência de irradiação.

A estrutura eletrônica dos semicondutores é tal que à temperatura de 0K, a banda de energia correspondente aos estados possíveis para os elétrons, isto é, banda de valência, e encontra-se completa, passando o semicondutor a comportar-se como um isolante. A banda de valência está separada da banda de estados possíveis mais próxima, denominada banda de condução, por uma banda proibida.

Essa banda é suficientemente pequena para que à temperatura ambiente alguns elétrons possam ser excitados termicamente ou por absorção de radiação para a banda de condução do material por ação de um campo magnético (Rodrigues C. N., 1997). Assim, quando a radiação solar incidente no material semicondutor, como se encontra representado na figura 14, a energia dos fótons é transferida para o sistema eletrônico do material, podendo excitar elétrons da banda de valência  $E_V$  caso a energia seja suficiente.

Os elétrons movem-se então para a banda de condução de energia  $E_C$ , deixando lacunas que correspondem às orbitais livres que são deixados vagos pelos elétrons que passam para a banda de condução, nos seus lugares, dando origem à criação de pares de elétrons- lacuna. (MAPOTA, 2009)



**Figura 14- Diagrama de Bandas de energia de um semicondutor**  
**Fonte: (Adaptado , MAPOTA, 2009).**

Energia de um fóton de frequência  $\nu$  é dada pela lei de Planck:

$$E = h * \nu \quad (8)$$

Onde:

$\nu$  = frequência de radiação [ Hz]

$h$  = constante de Planck [  $6,626 \times 10^{-34}$  J.s]

Como  $h$  é a constante de Planck, e  $\nu$  a frequência da radiação associada ao fóton, para qualquer frequência está implicado o comprimento de onda, e pela relação expressa por  $c = \lambda * \nu$ . A lei de Planck pode ser definida por:

$$E = \frac{h * c}{\lambda} \quad (9)$$

Onde:

$h$  = constante de Planck [  $6,626 \times 10^{-34}$  J.s]

$c$  = velocidade da luz no vacuo [  $3 \times 10^9$  m.s<sup>-1</sup>]

$\lambda$  = comprimento de onda [m]

O fenômeno conhecido por fotocondutividade é definido pelo aumento da condutividade elétrica de um elemento semiconductor, quando a radiação a certa frequência incide sobre o material (Mapota, 2009). Esse fenômeno ocorre sempre que uma radiação incidente com energia superior à banda proibida do semiconductor é usada para irradiá-lo. Quando o elétron penetra no semiconductor, o fóton só pode gerar um par elétron- lacuna se a energia for superior á banda proibida  $\lambda * \nu \geq E_g$ , o que implica que existe um comprimento de onda de corte  $\lambda_c$ , a partir do qual não existe absorção da radiação no espectro solar, dado por:

$$\lambda_c = \frac{h * c}{E_g} \quad (10)$$

No caso do silício cristalino, em que  $E_g=1.12\text{eV}$ , a absorção da radiação com geração de pares só ocorre para comprimentos de onda inferiores a  $\lambda_c=1,1\mu\text{m}$ , havendo uma larga faixa do espectro solar qual não é aproveitada para a conversão fotovoltaica. Os

pares de elétrons-lacuna gerados tendem a ocupar por relaxação, num intervalo de tempo muito curto, os níveis de menor energia nas respectivas bandas, a energia em excesso é dissipada na forma de calor.

Desse modo, a energia ganha por cada par de elétron-lacuna gerado pela absorção de um fóton onde a energia deste é igual à energia da banda proibida  $E_g$ . Passando para a banda de condução os elétrons acabam se recombinando com os pares de elétron-lacuna, não dando origem a qualquer corrente elétrica.

Como o aparecimento de pares de elétrons-lacuna não é suficiente para a criação de uma corrente elétrica usável, havendo a necessidade de recorrer a uma processo que promova a separação dos portadores de carga fotogeradas.

O processo mais difundido para promover a separação dos portadores, consiste na utilização de uma barreira de potencial que se estabelece na interface de junção de dois semicondutores diferentes é conseguido introduzido impurezas especiais denominadas dopantes, que controlam as concentrações relativas de elétrons na banda de condução e de lacunas na banda de valência.

A adição durante a formação do cristal de silício de átomos de elementos do grupo V da tabela periódica, como cinco elétrons nos orbitais de valência, como por exemplo, o fósforo, conduz a que quatro elétrons patinham os orbitais de valência com quatro átomos de silício envolventes e permitam a passagem de um elétron desemparelhado para a banda de condução. Os semicondutores dopados, desse modo, são denominados condutores tipo n, por possuírem portadores de carga predominantemente negativa.

Adicionando átomos do grupo III da tabela periódica, pois possuem três elétrons na camada de valência um dos elementos utilizados é o boro, o fato que o átomo de silício, dando origem a uma lacuna na banda de valência. Essa lacuna pode atrair um elétron de um átomo vizinho ficando o orbital preenchido e dando origem a uma propagação da lacuna no cristal. Os semicondutores assim dopados dizem-se do tipo p por possuírem portadores de carga predominantemente positivos às lacunas (Mapota, 2009).

Quando é formada a junção p-n na interface entre dois semicondutores dos tipos p e n, os elétrons livres do material do tipo n fluem para o material do tipo p, dando origem á formação de um forte campo elétrico na interface que impede a continuação do fluxo independente e constitui uma barreira de potencial.

A luz solar, ao incidir no material semiconductor da célula, gera pares de elétrons – lacuna em ambos os lados da junção, que se movem por ação do campo elétrico da junção em sentidos contrários (Mapota, 2009). As lacunas no material do tipo n se movem para a superfície superior, sendo a corrente gerada no interior do semiconductor recolhida através de contatos metálicos colocados no topo e base da célula (LIBRA, M.; POULEK, V., 1998).

#### 4.1.1.1 Determinação de corrente, tensão e potência célula fotovoltaica

Células solares são dispositivos semicondutores fotossensíveis, cuja importância reside no fato de terem a propriedade de converter parte da luz incidente em energia elétrica de corrente contínua quando submetida à luz natural ou artificial. Alguns materiais semicondutores exibem o efeito fotoelétrico que consiste na absorção de fótons e consequente emissão de elétrons, que são a base da corrente elétrica.

Com a geração de corrente aparecerá uma diferença de tensão nos terminais; esses parâmetros são calculados pelas formulas a seguir. A expressão que rege a variação da intensidade da corrente  $I_D$  que se fecha através de um diodo com diferença de potencial nos terminais deste,  $V$  é a equação de Shockley.

$$I_d = I_o * \left( e^{\left( \frac{V}{m * V_T} \right)} - 1 \right) \quad (11)$$

Onde:

$I_o$  = Corrente inversa de saturação (ou de fulga) que atravessa o diodo;

$V$  = Diferença de potencial aos terminais do diodo;

$m$  = Fator de idealidade do diodo ( $m = 1$ , diodo real  $m > 1$ );

$V_T$  = Potencial térmico ( $V_T = \frac{K * T}{q}$ )

$K$  = Constante de Boltzman ( $K = 1.38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$ )

$q$  = Valor absoluto da carga de eletron ( $q = 1,6 \times 10^{-19} C$ )

$T$  = Temperatura absoluta (Kelvin)

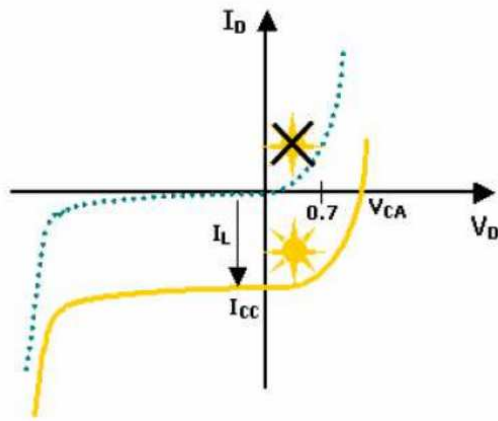
A corrente  $I_D$  anula-se quando  $V = 0$ , aumentando exponencialmente para valores

positivos de  $qV$  e diminuindo  $qV$  é negativo para valores negativos para um valor de corrente se saturação negativo  $-I_o$  (tornando o termo exponencial desprezível).

A equação que exprime a variação da corrente em função da tensão para a célula fotovoltaica é dada por:

$$I = I_L - I_o * \left( e^{\left(\frac{V}{m * V_T}\right)} - 1 \right) \quad (12)$$

$I_L$  é a corrente gerada pela exposição à radiação solar ou luz artificial. Comprova-se que se não existir radiação solar,  $I_L = 0$ .



**Figura 15 – Curva característica célula irradiada**  
**Fonte: (MAPOTA, 2009).**

Dois parâmetros são extraídos da curva de células irradiadas, com o sistema de eixos, para uma dada radiação e temperatura, permitem caracterizar uma célula fotovoltaica, fazendo  $V=0$  temos a corrente de curto circuito  $I_{CC}$ .

$$I_{CC} = I_L \quad (13)$$

Fazendo a corrente igual a zero, temos a tensão máxima aos terminais da célula essa tensão é chamada de tensão de circuito aberto  $V_{CA}$ .

$$V_{CA} = m * V_T * \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (14)$$

Num curto-circuito ou em circuito aberto a potência é nula. A potencia máxima que se pode extrair da célula  $P_{mp}$ , ocorre para o ponto da curva característica onde o produto  $I*V$  é máximo, ou seja, pra o ponto onde  $\frac{d(I*V)}{d(V)} = 0$ .

O valor de tensão no ponto de máxima potência é dado por:

$$V_{mp} = V_{CA} - m * V_T * \ln\left(\frac{V_{mp}}{m * V_T} + 1\right) \quad (15)$$

O ponto de máxima corrente é dada por:

$$I_{mp} = I_0 - \frac{V_{mp}}{V_T} * \left(e^{\left(\frac{V_{mp}}{V_T}\right)}\right) \quad (16)$$

Assim para se determinar o ponto de máxima potência, vem da expressão:

$$P_{mp} = V_{mp} * I_{mp} \quad (17)$$

#### 4.1.1.2 Parâmetros de referência

A Comissão Técnica de Normalização para Energia Fotovoltaica de CEI (Comissão Eletrotécnica Internacional), definiu que a comparação fosse efetuada para valores pico ou de referência STC (Standard test condition) que são, a temperatura, ( $t = 25^\circ\text{C} \Rightarrow t = 298,16 \text{ K}$ ) e a irradiância solar ( $G = 1000 \text{ Wm}^{-2}$ ). Para as condições de referência, utiliza-se como parâmetros de comparação, os valores de  $I_{CC}$ ,  $V_{CA}$  e  $P_{mp}$  (fornecidos pelo fabricante). Não é habitual, mas pode constar dados do rendimento e do fator de forma.

O rendimento  $\eta_{ref}$  é definido como a razão entre a potência máxima produzida pela célula e a potência da radiação que nela incide nas condições de referência.

$$\eta_{ref} = \frac{P_{mp}}{A * 1000} \quad (18)$$

Sendo A, a área de superfície da célula. O fator de forma FF é definido como a razão



entre a potência máxima e o produto da tensão em circuito aberto pela corrente de circuito aberto

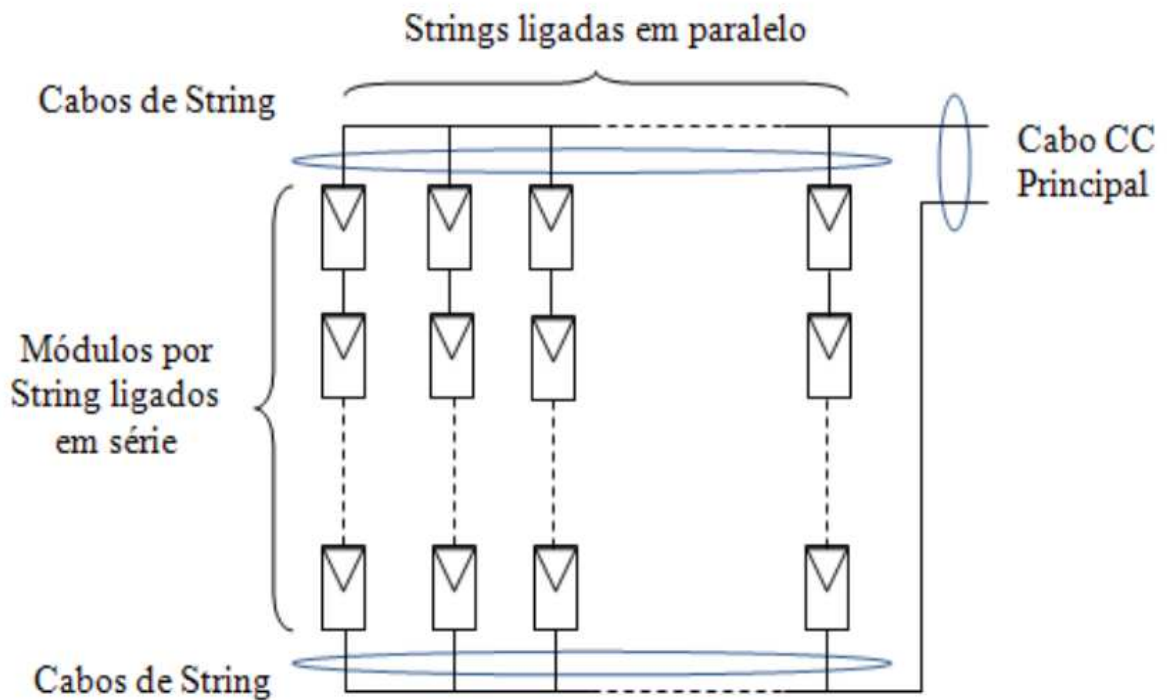
$$FF = \frac{V_{mp} * I_{mp}}{V_{ca} * I_{CC}} \quad (19)$$

#### 4.1.1.3 Gerador fotovoltaico

A unidade fundamental do gerador fotovoltaico são as células fotovoltaicas, que convertem a energia da radiação solar diretamente em energia elétrica. Uma célula típica tem uma área de superfície de  $100 \text{ cm}^2$ , produz em uma condição de pico uma potência que dependendo do rendimento da célula varia de 1,0 a 1,7 W, a uma tensão de cerca de 0,5 V.

Para a fabricação de um modulo fotovoltaico são escolhidas células com curvas características semelhantes que depois são ligadas em série encapsuladas. Geralmente, os módulos fotovoltaicos são constituídos por 36 células ligadas em série, de modo que a tensão máxima seja aproximada da tensão nos sistemas de armazenamentos (12V ou 24 V).

Ao conjunto de módulos se dá o nome de gerador fotovoltaico. A ligação de um conjunto de módulos em série se dá o nome de fileira ou string, podendo o gerador fotovoltaico ser constituído de várias string's.



**Figura 16 - Composição de um gerador fotovoltaico**  
**Fonte: (MAPOTA, 2009).**

Os fabricantes caracterizam os módulos fotovoltaicos em termos das curvas características, nas condições de pico e pelos respectivos parâmetros  $I_{cc}$ ,  $V_{ca}$  e  $I_{mp}$ . A temperatura normal de funcionamento das células dentro do módulo NOCT é que determina a potência que o módulo pode produzir.

Define-se como a temperatura atingida nas células de um circuito aberto para a irradiância de  $800 \text{ W.m}^{-2}$ , quando a temperatura ambiente é de  $20^\circ\text{C}$  e a velocidade do vento em  $1\text{m/s}$ .

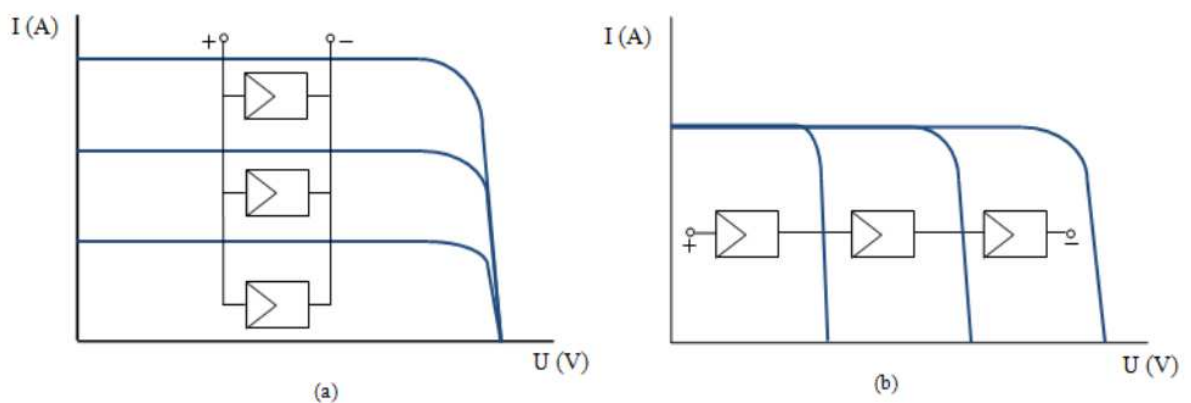
A temperatura de funcionamento da célula  $T_{cel}$  e da temperatura ambiente é  $T_{amb}$ , variando linearmente com a irradiância solar  $G$  incidente no módulo e a velocidade na ordem de  $1 \text{ m/s}$ .  $T_{cel}$  é equacionada por :

$$T_{cel} = T_{amb} + \frac{NOCT - 20^\circ\text{C}}{800} * G \quad (20)$$

Na formação dos módulos fotovoltaicos são escolhidos as células com curvas características semelhantes, como já foi citado, mas na prática a curva característica varia de célula para célula o que

conduz a perda por desfazamento entre as curvas características, habitual designadas de perda por mismatch. Os módulos fotovoltaicos são combinados entre si através de ligações em série ou paralelo. (MAPOTA, 2009).

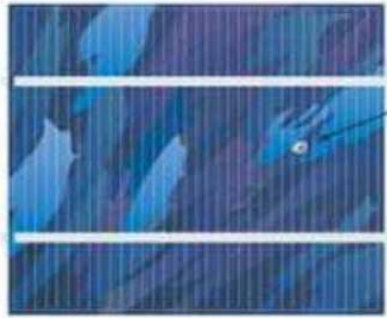
Os módulos ligados em série constituem as fileiras. Para minimizar as perdas de potência no sistema, apenas deverão ser utilizados módulos do mesmo tipo. Nas figuras, estão exemplificadas as curvas de I-V de módulos ligados em série e em paralelo. Notamos que o numero de módulos ligados em série perfaz a tensão do sistema, que por sua vez determina a tensão aos terminais dos módulos.



**Figura 17 – a) Ligação em paralelo de três módulos b) Ligação em serie de três módulos**

**Fonte: (MAPOTA, 2009).**

Além das perdas por desadaptação (mismatch), pode ocorrer um ponto quente (hot spot) que faz com que a célula aqueça, fazendo com que o gerador fotovoltaico não atinja o rendimento previsto. Esse ponto quente é gerado por uma corrente em excesso que acaba danificando um célula ou grupo de células do módulo. A célula danificada gera uma polarização inversa, dissipando energia que pode causar sobreaquecimento, danificando o encapsulamento e degradando o desempenho de todo o módulo.

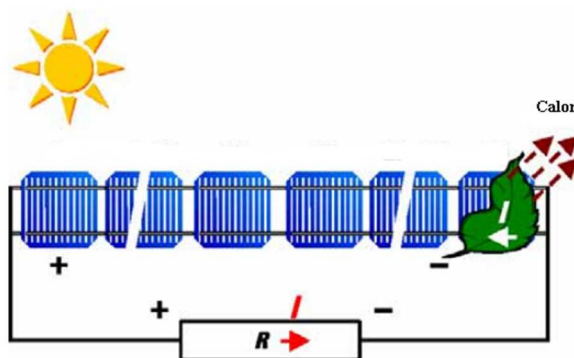


**Figura 18 – Célula solar com ponto quente (hot spot)**  
**Fonte: (MAPOTA, 2009).**

Se por algum motivo uma das células fotovoltaicas ficar totalmente obscurecida, esta passará a estar inversamente polarizada, atuando como uma carga elétrica e convertendo a energia elétrica em energia térmica. Se a corrente que atravessa a célula for suficientemente grande poderá resultar em um ponto quente (hot spot).

A maior intensidade de corrente que pode fluir através da célula é a corrente de curto circuito. Essas correntes ocorrem com frequência nos sistemas fotovoltaicos autônomos equipados com conversores shunt.

Para evitar esses pontos quentes, devesse evitar local onde possa haver algo que cause sobrecarga nos módulos de conversão solar como (chaminé, antenas, construções, árvores, etc).

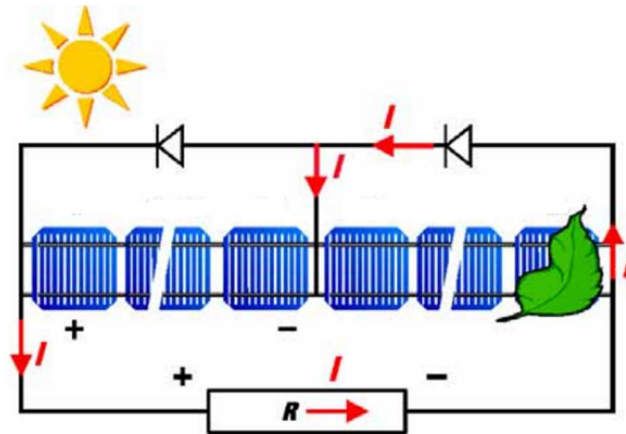


**Figura 19 – Esquemático de um módulo sem diodo de derivação**  
**Fonte: (MAPOTA, 2009).**

Uma tensão de 12V pode ser gerada a partir de 18 a 20 células. Com esse nível de tensão, é possível que a corrente inversa flua através das células solares sombreadas. Para prevenir isso e evitar os pontos quentes, a corrente deve ser desviada da célula através de

uma derivação de corrente.

Essa derivação é conseguida através de um diodo de derivação ou bypass, ligado em antiparalelo com as células fotovoltaicas. A máxima tolerância ao sombreamento, seria conseguida caso existisse um diodo de derivação por cada célula; mas, na pratica e para reduzir custos, são normalmente usando apenas dois diodos de derivação.



**Figura 20 –Esquemático de módulo com diodos de derivação**  
**Fonte: (MAPOTA, 2009).**

Sem o diodo de derivação, a corrente total do modulo estaria determinada pela célula sombreada. Os diodos de derivação geralmente estão alojados na caixa de junção dos módulos.



**Figura 21 – Diodo de derivação ( bypass)**  
**Fonte: (MAPOTA, 2009).**

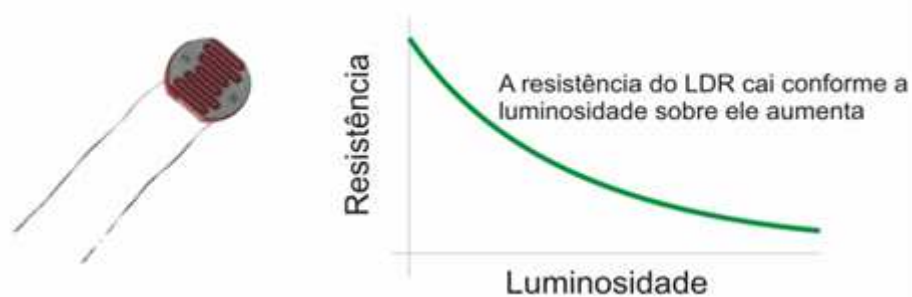
#### 4.1.2 Sistema óptico

Os sensores podem ser classificados como um tipo de transdutor. Um transdutor é um componente que transforma um tipo de energia em outro. Um motor, por exemplo, é um tipo de transdutor, pois converte energia química ou elétrica em energia mecânica.

Porém, um sensor pode ser definido como um transdutor específico, que transforma algum tipo de energia (luz, calor, movimento) em energia elétrica, utilizada para a leitura de alguma condição ou característica do ambiente. Apesar de ser imensa a variedade de sensores eletrônicos, podemos dividi-los basicamente em dois tipos: sensores analógicos e sensores digitais. Essa divisão é feita de acordo com a forma a qual o componente responde à variação da condição.

Os sensores analógicos são os dispositivos mais comuns. Tais sensores são assim designados pois baseiam-se em sinais analógicos. Sinais analógicos são aqueles que, mesmo limitados entre dois valores de tensão, podem assumir infinitos valores intermediários. Isso significa que, pelo menos teoricamente, para cada nível da condição medida, haverá um nível de tensão correspondente.

O sensor base deste projeto, quando um LDR, um dispositivo cuja resistência varia de acordo com a luminosidade, é submetido a uma luz cada vez mais intensa, pode-se verificar que sua resistência diminuirá gradativamente. Utilizando um circuito divisor de tensão, podemos fazer com que através dessa variação da resistência, haja uma variação na tensão.

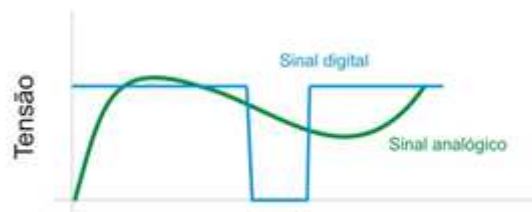


**Figura 22- LDR**

**Fonte:**

([http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000\\_kdr5000/tutorial\\_eletronica\\_-\\_aplicacoes\\_e\\_funcionamento\\_de\\_sensores.pdf](http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf)).

Já os sensores digitais baseiam-se em níveis de tensão bem definidos. Tais níveis de tensão podem ser descritos como Alto (High) ou Baixo (Low), ou simplesmente “1” e “0”. Ou seja, esses sensores utilizam lógica binária, que é à base do funcionamento dos sistemas digitais. Ao contrário de um sensor analógico, onde os valores possíveis são teoricamente infinitos, um sensor digital poderá apenas alternar entre certos estados bem definidos, não sendo possível haver um valor intermediário entre eles.

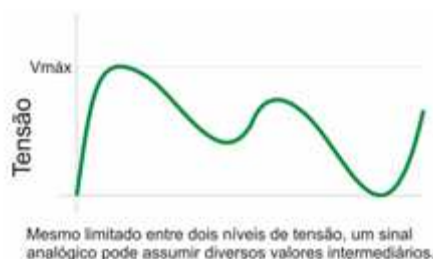


**Figura 23- Comparação sinal Digital & Analógico**

Fonte:

([http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000\\_kdr5000/tutorial\\_eletronica\\_-\\_aplicacoes\\_e\\_funcionamento\\_de\\_sensores.pdf](http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf)).

Como já foi exposto anteriormente, os sensores analógicos são aqueles que respondem através de sinais analógicos, ou seja, sinais que, mesmo limitados em uma certa faixa, podem variar entre inúmeros valores de tensão intermediários.



**Figura 24 - Exemplo de um sinal analógico**

Fonte:

([http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000\\_kdr5000/tutorial\\_eletronica\\_-\\_aplicacoes\\_e\\_funcionamento\\_de\\_sensores.pdf](http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf)).

Num sensor analógico “ideal”, para a variação de uma determinada condição, haverá uma variação na mesma proporção de alguma de suas propriedades, como tensão ou resistência.

Os sensores “reais”, porém, estão sujeitos às influências de diversos tipos e possuem certas limitações ao seu funcionamento, não funcionando de forma tão perfeita. Fatores como a temperatura e a umidade do ambiente podem gerar certos erros de medida e os materiais utilizados em sua construção limitam a sensibilidade e a faixa de operação do componente.

Poderemos notar que grande parte dos sensores são analógicos, pois quase todos os parâmetros que serão medidos também o são. A luminosidade de um ambiente, por exemplo, pode assumir infinitos valores entre a luz intensa e a escuridão total.

A utilização desses sensores num circuito analógico é realizada sem problemas; porém, quando for necessário monitorá-lo através de algum circuito digital, como um microcontrolador ou um computador, esse sinal deverá ser convertido num sinal digital equivalente. Isso porque o funcionamento desses sistemas baseia-se em sinais digitais, que podem ser gravados e processados muito mais facilmente do que os analógicos.

Podemos classificar os sensores analógicos de acordo com o modo o qual respondem às variações. Tal resposta deverá ser na forma da variação de alguma propriedade elétrica, como resistência, tensão, capacitância, dentre outros.

Os sensores resistivos são aqueles que em circuitos comportam-se como resistores, mas, devido a certas propriedades físicas ou químicas, variam o valor de sua resistência de acordo com certas características, como luminosidade ou temperatura. Esses são os modelos mais comuns, dentre os quais podemos destacar o LDR.

A aplicação mais conhecida do LDR é, sem dúvida, na iluminação pública, onde ele é utilizado para que, de acordo com a claridade do ambiente, sejam ligadas ou desligadas as lâmpadas automaticamente.

A resistência do LDR varia de acordo com a equação 21.

$$R = C * Lux * a \quad (21)$$

Onde:

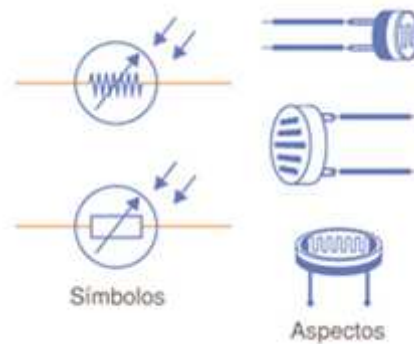
Lux – luminosidade em Lux ;

C – contante que depende do processo de fabricação;



a – contante que depende do processo de fabricação.

O LDR não tem pinagem, ou seja, podemos ligar seus terminais de qualquer forma. Ele representado em esquemas eletrônicos com o seguinte símbolo.



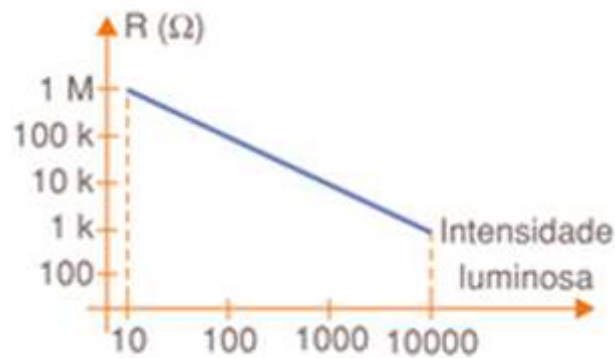
**Figura 25- Simbologia LDR**

**Fonte:**

([http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000\\_kdr5000/tutorial\\_eletronica\\_-\\_aplicacoes\\_e\\_funcionamento\\_de\\_sensores.pdf](http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf)).

Os LDRs são compostos por sulfeto de cádmio (CdS), um material semicondutor, que é disposto num traçado ondulado na superfície do componente. Esse material tem a propriedade de diminuir sua resistência à passagem da corrente elétrica quando a luminosidade sobre ele aumenta.

Com o auxílio de um multímetro, podemos verificar facilmente como ocorre esse fato. Num ambiente escuro, sua resistência será alta, podendo chegar a valores altos, próximos ou até superiores a 1 M $\Omega$ . Mas se aumentarmos gradativamente a intensidade da luz que incide sobre ele, podemos verificar que sua resistência cairá, podendo chegar a valores próximos de 1 k $\Omega$ . Esses valores, no entanto, dependem de vários fatores, como o componente utilizado, a quantidade de luz no ambiente e o próprio multímetro. Podemos verificar abaixo o gráfico de resposta do LDR.

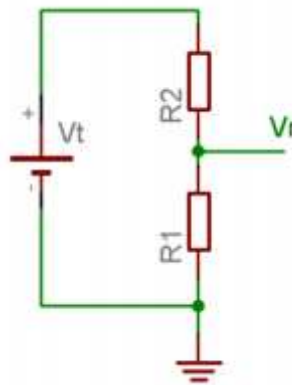


**Figura 26- Resposta do LDR a luminosidade**

Fonte:

([http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000\\_kdr5000/tutorial\\_eletronica\\_-\\_aplicacoes\\_e\\_funcionamento\\_de\\_sensores.pdf](http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf)).

Para fazer a medida da luminosidade do ambiente através do LDR, precisamos fazer com que a variação da resistência do componente seja convertida numa variação de tensão. Essa tensão pode ser utilizada por um circuito externo ou ser monitorada através das entradas analógicas do microcontrolador ATmega328. O meio mais fácil de conectá-lo é através de um divisor de tensão.



**Figura 27 - Divisor de tensão**

Fonte:

([http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000\\_kdr5000/tutorial\\_eletronica\\_-\\_aplicacoes\\_e\\_funcionamento\\_de\\_sensores.pdf](http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf)).

Um divisor de tensão é composto por dois resistores ligados em série. A tensão no ponto entre esses dois resistores depende das suas resistências e da tensão de alimentação e pode ser calculada através de uma fórmula simples.

$$V_r = \frac{V_t * R_1}{R_1 + R_2} \quad (22)$$

Onde:

$V_r$  = Tensão do LDR

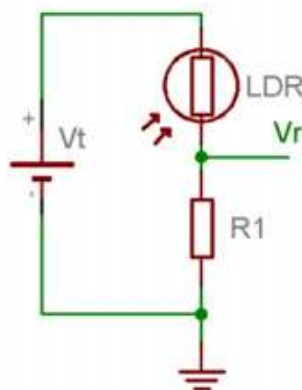
$R_1$  = Resistor

$R_2$  = Resistor

$V_t$  = Tensão Fonte

Como o LDR é um sensor resistivo, podemos substituir um dos resistores do divisor de tensão por este componente. No esquema acima, substituindo  $R_2$  por um LDR, temos um circuito cuja tensão aumenta de acordo com a luminosidade do ambiente.

Podemos verificar isso na fórmula acima: quando a quantidade de luz que incide sobre o LDR cresce, sua resistência cai, fazendo com que o valor de  $V_r$  aumente. No lugar de  $R_1$ , recomendamos colocar um resistor cujo valor fique entre os valores máximos e mínimos do LDR. Podemos também trocá-lo por outros valores, observando sua influência no valor de saída do divisor de tensão.



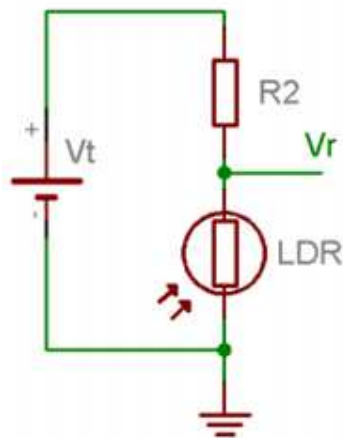
**Figura 28 - Divisor de tensão com LDR**

**Fonte:**

([http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000\\_kdr5000/tutorial\\_eletronica\\_-\\_aplicacoes\\_e\\_funcionamento\\_de\\_sensores.pdf](http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf)).

É possível também trocar a posição do LDR, colocando-o no lugar do R1. Nesse caso, teremos um circuito cujo funcionamento é contrário ao mostrado acima.

O valor da tensão  $V_r$  aumentará quando a luminosidade do ambiente diminuir. Na fórmula do divisor de tensão, podemos notar que, quanto menor o valor de R1, menor será o valor de  $V_r$ .

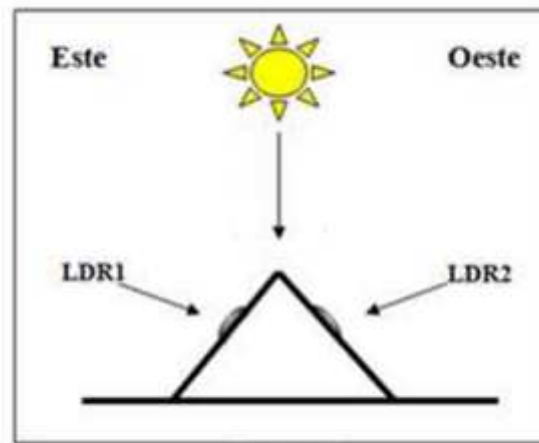


**Figura 29 - Divisor de tensão com LDR, com LDR na base**

**Fonte:**

**([http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000\\_kdr5000/tutorial\\_eletronica\\_-\\_aplicacoes\\_e\\_funcionamento\\_de\\_sensores.pdf](http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf)).**

O sensor óptico desenvolvido para este protótipo está montado com a divisão de tensão demonstrada na figura 29, onde o valor de tensão aumenta com o aumento a luminosidade. O sensor desenvolvido é constituído por 4 LDR's, dispostos em uma pirâmide quadrada de maneira que forme uma defasagem de  $45^\circ$  entre os mesmos. Essa defasagem possui a função de mudar o plano de recebimento da luminosidade.

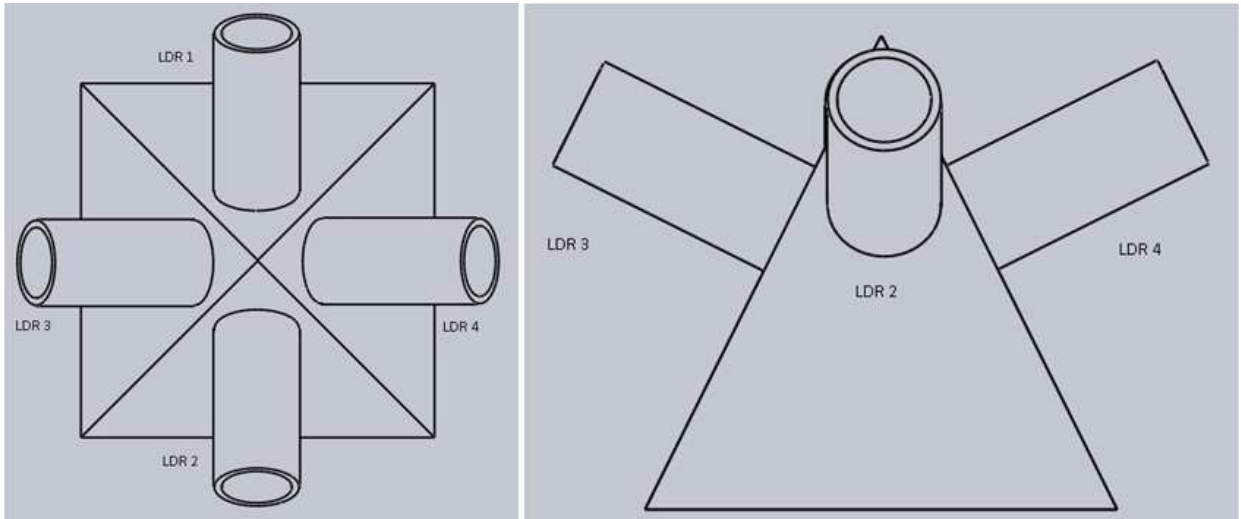


**Figura 30 - Esquemático em corte longitudinal do sensor óptico**  
**Fonte: (MAPOTA, 2009).**

Essa tensão do sinal analógico pode ser representada por um número no intervalo de 0 a 5 V, O formato piramidal da base de fixação dos sensores aproveita o movimento relativo de sol durante o dia; isso provoca uma variação na luminosidade recebida pelo LDR's e conseqüentemente uma variação na tensão dos quatro componentes.

O microcontrolador recebe as quatro tensões através das portas analógicas e compara por pares (superior com inferior; direita com esquerda); verifica se metade da tensão recebida pelos dois pares de sensores e em seguida coloca as suas saídas no sentido de acionar os servomotores para realinhar a estrutura que suporta o sistema de conversão de energia fotovoltaico. Os sensores LDR's são adequados para esse tipo de protótipo, pois os mesmos possuem um ótimo tempo de resposta.

O fato que o sensor possuir tudo que envolvem os sensores LDR's, vem do fato da necessidade de diminuir o efeito dispersivo da luz, sobre os sensores LDR's.

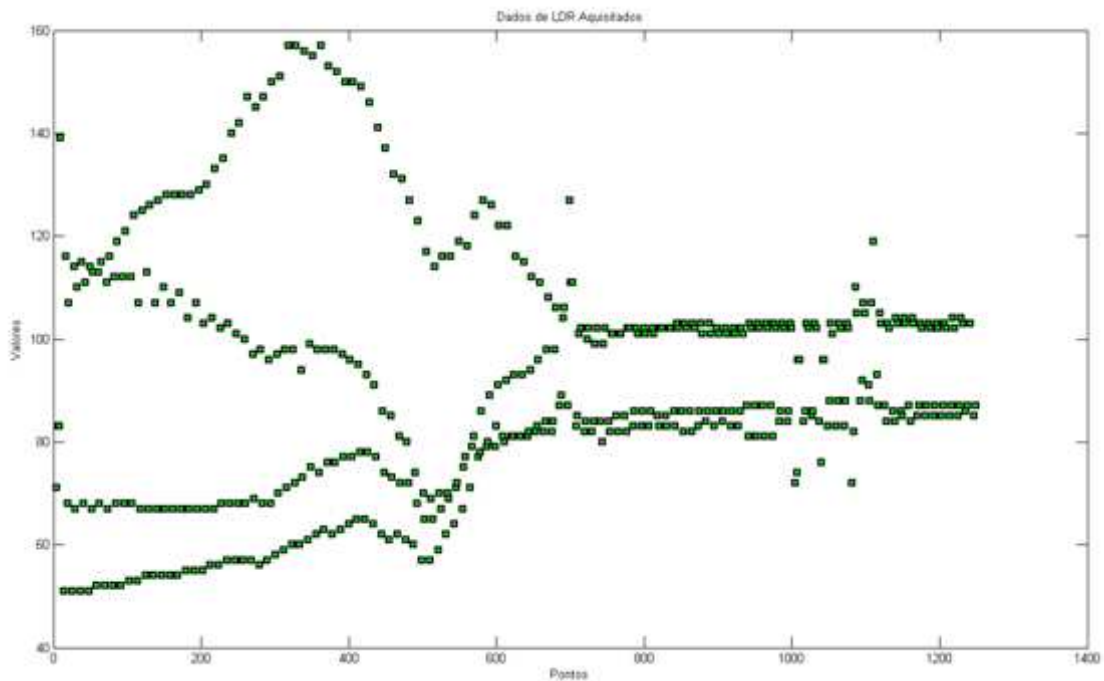


**Figura 31 - Vista superior e lateral do sensor óptico**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 32 - Sensor montado para o protótipo**  
**Fonte: Autoria própria.**

Foi possível acompanhar em tempo real a evolução de sistema de rastreamento e, devido a efeitos de nuvens, notamos uma dispersão nas medições (visível a partir do índice de tempo 100 pontos), mas o sistema logo se ajusta, configurando a habilidade de se auto ajustar ao ambiente.



**Figura 33 - Resultado do rastreo usando o Matlab dos sensores LDR's**  
**Fonte: Aatoria própria.**

A figura 33 demonstra o período de transição em que o sistema de rastreo busca a melhor orientação para o sistema de conversão. Analisando-a, podemos observar o comportamento do rastreamento solar para aproximadamente os 700 pontos de medição: o valor comparativo dos pares de sensores se mantém igual. Isso implica que a face da placa está orientada perpendicularmente ao sol e, portanto, o sistema de rastreo cumpre a sua função.

#### 4.1.3 Servomotores

O sistema de movimentação para este protótipo utiliza dois servomotores modelo TowerPro SG5010. Esse tipo de servo possui a característica de 3 pares de pólos de ferrite, todo o equipamento de nylon; rolamento de esferas no topo, tensão de funcionamento: 4.8V~6.0V, velocidade de operação de 0.20 s/60° (4.8V) e 0.16 s/60° (6.0V), suporta no binário de paragem ; 5,2 kg \* cm (4.8V) e 6,5 kg \* cm (6.0V), e opera entre as temperaturas de : -20 ° C ~ 60 ° C .

O servomotor é um dispositivo eletromecânico que, a partir de um sinal elétrico de entrada, pode posicionar, com boa precisão, uma determinada posição angular. Esse dispositivo, por sua versatilidade e precisão, é usado em aplicações de robótica e

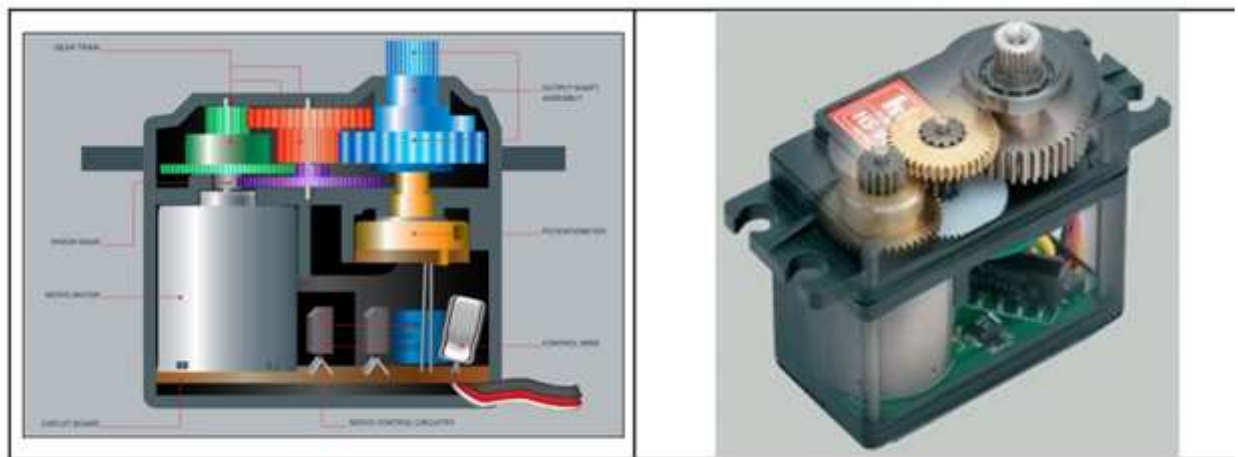
modelismo.

O servomotor possui um sistema eletrônico de controle um potenciômetro, que é ligado ao eixo de movimento de saída. Esse potenciômetro possibilita ao circuito de controle saber a posição angular do servo, monitorando o mesmo.

Se o eixo estiver no ângulo correto, o motor para. Se o circuito detecta que a posição está incorreta, o sistema de controle ativa o servo até que o ângulo desejado tenha sido atingido.

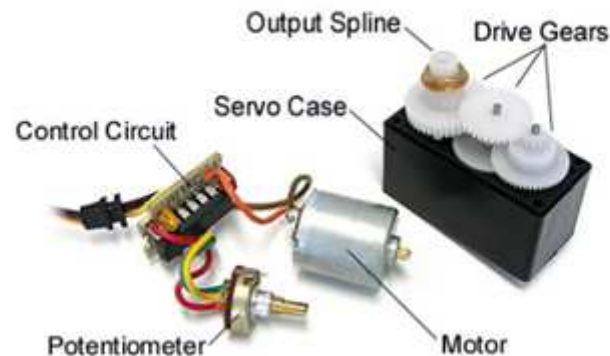
Na montagem física do servomotor há um conjunto de engrenagens que têm a função de aumentar a torque do motor. Nesse sistema de engrenagem existe um limitador de curso que atua limitando o deslocamento do eixo do servomotor em um semicírculo.

A figura a seguir demonstra os componentes básicos do modelo de servo utilizado no projeto.



**Figura 34 - Componente do servomotor**  
Fonte: (MUHAMMAD, 2001).





**Figura 35 - Servo**  
**Fonte: (MUHAMMAD, 2001).**

Control Circuit [Circuito de controle] = É responsável por receber os sinais e energia enviados pelo microcontrolador, monitorando a posição do potenciômetro e controla o motor de acordo com o sinal emitido pelo PWM (Pulse Width Modulation).

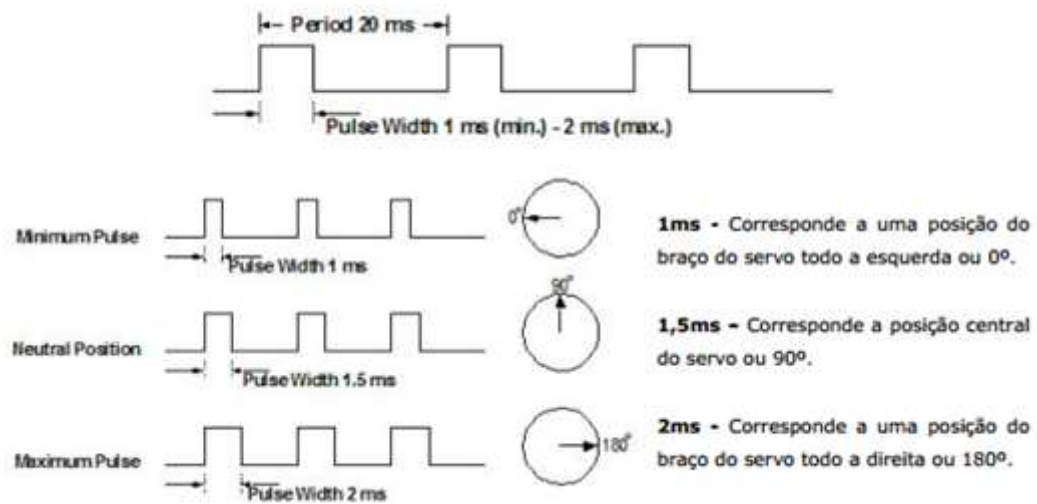
Potenciometer [Potenciômetro] = Potenciômetro é um componente eletrônico que possui resistência elétrica ajustável, no conjunto do servomotor ele é responsável pela determinação do ângulo que o eixo do servomotor de encontra, essa determinação é feita pela variação da resistência elétrica.

Motor [Motor] = Movimenta o sistema de eixo e engrenagem, está ligado ao eixo principal do servomotor.

Drive Gears [Engrenagens] = Reduz a rotação do motor e transferem mais força ao eixo principal e movimentam o potenciômetro junto com o eixo.

Servo Case [Caixa do servo] = Estrutura que suporte para os outros componentes citados anteriormente.

Quando se trata do ângulo de eixo principal, o mesmo é determinado a partir da duração da largura de pulso emitida pelo PWM enviado pelo microcontrolador arduino, este sinal é enviado à entrada do servomotor. Esse sinal pode ser entre “0 volt ou 5 volts”. O circuito de controle do servo fica monitorando este sinal enviado pelo PWM em um intervalo de 20 ms; se, dentro deste intervalo ele recebe uma alteração do sinal de 0 V ou 5 V durante 1 ms à 2 ms, ele altera a posição do eixo principal para coincidir com o sinal que recebeu .



**Figura 36 - PWM - Servos**  
**Fonte: (Adaptado , MUHAMMAD, 2001).**

Cada vez que o servomotor recebe uma alteração no sinal ele verifica se o potenciômetro encontra-se na posição correspondente. Se estiver, ele não movimentará o eixo principal. Se o potenciômetro não estiver na posição correspondente ao sinal recebido, o circuito aciona o motor até que o potenciômetro se encontre na posição correta.

A direção de rotação do servo motor vai depender também da posição do potenciômetro. O motor vai girar na direção que mais rápido leva-lo ao valor do sinal emitido pelo PWM.

O programa de controle dos servomotores foi desenvolvido para a placa arduino UNO R3 e foi escrita na linguagem de programação C, e o trecho do código de controle os servos está exemplificado as seguir:

```

if(valLeft - valRight > 2 || valLeft - valRight < -2)
{
    if(valLeft > valRight && valRotation > 0)
    {
        valRotation--;
    }
    if(valRight > valLeft && valRotation < 180)
    {

```

```
        valRotation++;  
    }  
}  
if(valTop - valDown > 2 || valTop - valDown < -2)  
{  
    if(valTop > valDown && valPitch > 0)  
    {  
        valPitch--;  
    }  
    if(valDown > valTop && valPitch < 180)  
    {  
        valPitch++;  
    }  
}
```



**Figura 37 - Estrutura de movimentação**  
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.1.4 Sensor de temperatura

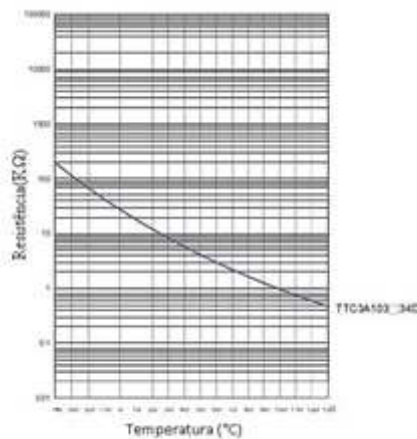
O sensor de temperatura utiliza um termistor modelo TTC3A103#39H que retorna a temperatura ambiente sob a forma de um valor de resistência o qual é então usado para alterar  $V_{cc}$  (5V ). Essa placa, então, converte o valor de tensão medida através de um pino de entrada analógica ("5"no caso) para um temperatura; a faixa de operação é de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $125^{\circ}\text{C}$ , com uma precisão de  $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ .

Como a temperatura aumenta, de acordo com o valor da resistência do sensor diminui:



**Figura 38 - Sensor de Temperatura**

Fonte: ([http://www.seeedstudio.com/wiki/index.php?title=GROVE\\_-\\_Starter\\_Bundle\\_V1.0b#Temperature\\_Sensor\\_Twig](http://www.seeedstudio.com/wiki/index.php?title=GROVE_-_Starter_Bundle_V1.0b#Temperature_Sensor_Twig)).



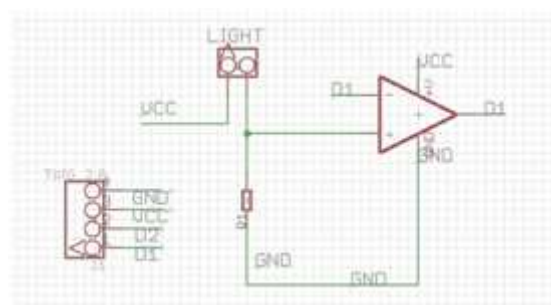
**Figura 39 - Variação da resistência com a Temperatura**

Fonte: ([http://www.seeedstudio.com/wiki/index.php?title=GROVE\\_-\\_Starter\\_Bundle\\_V1.0b#Temperature\\_Sensor\\_Twig](http://www.seeedstudio.com/wiki/index.php?title=GROVE_-_Starter_Bundle_V1.0b#Temperature_Sensor_Twig)).

O programa de controle do sensor de temperatura foi desenvolvido para a placa arduino UNO R3 e foi escrita na linguagem de programação C, com o objetivo de ter o

parâmetro de temperatura para ser usado no cálculo da potência nas células fotovoltaicas:

```
// sensor de temperatura
int a;
a=analogRead(4);
int del=1000;
float ctemperatura;
float ftemperatura;
int B=3975;
float reistencia ;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  resistencia=(float)(1023-a)*10000/a;
  ctemperatura=1/(log(resistencia/10000)/B+1/298.15)-273.15;
  ftemperatura=ctemperatura*9/5+32;
  Serial.print(ctemperatura);
  Serial.write(186);
  Serial.print("C ");
  Serial.print(ftemperatura);
  Serial.write(186);
  Serial.println("F");
  delay(del);
}
```



**Figura 40 - Esquemático do sensor de temperatura**  
**Fonte: Autoria própria.**

#### 4.1.5 Arduino

O Arduino é uma plataforma de hardware livre projetada com um microcontrolador AVR da Atmel em uma única placa com acesso a todas as entradas e saídas do mesmo. Além de ter uma linguagem de programação padrão com origem no Wiring, que é essencialmente C/C++, tem o objetivo de ser uma ferramenta acessível, com baixo custo, que apresenta facilidade e flexibilidade na utilização por profissionais e amadores. Pode ser usado para o desenvolvimento de objetos interativos independentes, ou ainda para ser conectada a um computador.

Uma típica placa Arduino é composta por um controlador, algumas linhas de E/S digital e analógica, além de uma interface serial ou USB, para interligar-se ao computador, que é usado para programá-lo e interagir com ele em tempo real.

A interface do computador é simples, podendo ser escrita em várias linguagens. A mais popular é a Processing, mas outras que podem comunicar-se com a conexão serial são: Max/MSP, Pure Data, SuperCollider, ActionScript, Java e Matlab.

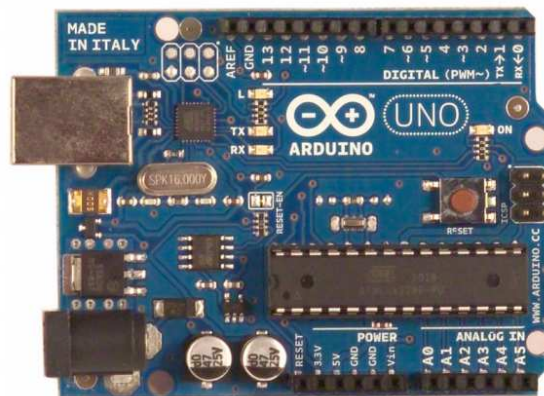
Como o Arduino apresenta várias versões de hardware com diferentes preços e aplicações, a descrição do mesmo vai ser feita para a versão UNO, utilizado neste trabalho. A Tabela 2 apresenta as principais características dessa versão.

**Tabela 2 - Características Arduino Uno**

<b>Microcontrolador</b>	<b>Atmege328P</b>
<b>Tensão de operação</b>	<b>5V</b>
<b>Tensão de entrada (recomendada)</b>	<b>7-12V</b>
<b>Tensão entrada (limite)</b>	<b>6-20V</b>
<b>Pinos de E/S digitais</b>	<b>14(6 PWM)</b>
<b>Pinos de entrada analógica</b>	<b>6</b>
<b>Corrente máxima por pino de E/S</b>	<b>40mA</b>
<b>Corrente máxima no pino de 3.3V</b>	<b>50mA</b>
<b>Memória Flash</b>	<b>32 KB</b>
<b>SRAM</b>	<b>2 KB</b>
<b>EEPROM</b>	<b>1 KB</b>
<b>Velocidade de Clock</b>	<b>16MHz</b>

A placa base do Arduino é mostrada na Figura 41 e pode ser confeccionada artesanalmente (o esquema de montagem da placa pode ser baixado gratuitamente do site oficial) ou ser adquirida pronta. Consiste em um microcontrolador de 8 bits da Atmel e em conectores para facilitar o desenvolvimento de aplicativos e a interação com outros circuitos.

Ressaltando, o microcontrolador possui 14 portas digitais de entrada, das quais seis podem ser usadas como saídas PWM. Possui seis entradas analógicas que também podem ser utilizadas como pinos de I/O digitais, um cristal de 16 MHz, conexão USB, um conector de alimentação, com conector para gravação IN-SYSTEM, e um botão de reset. Para utilizar o UNO, basta conectá-lo a um computador com um cabo USB ou ligá-lo com uma fonte DC ou mesmo em uma bateria.



**Figura 41– Arduino Uno rev3**  
**Fonte: [http : www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)**

O uno se difere de todas as placas antecessoras no sentido de não utilizar o chip FTDI para conversão do sinal serial. Utiliza no seu lugar um atmega8u2 programado como conversor de usb para serial.

Essa placa tem 6 entradas analógicas, etiquetadas de a0 a a5, com 10 bits de resolução. Por padrão elas medem de 0 a 5v, embora seja possível alterar o limite superior utilizando o pino AREF.

## 5. RESULTADOS

Para o projeto, foram utilizadas células fotovoltaicas de silício monocristalino com características de acordo com a tabela 2.

**Tabela 3 - Características célula fotovoltaica**

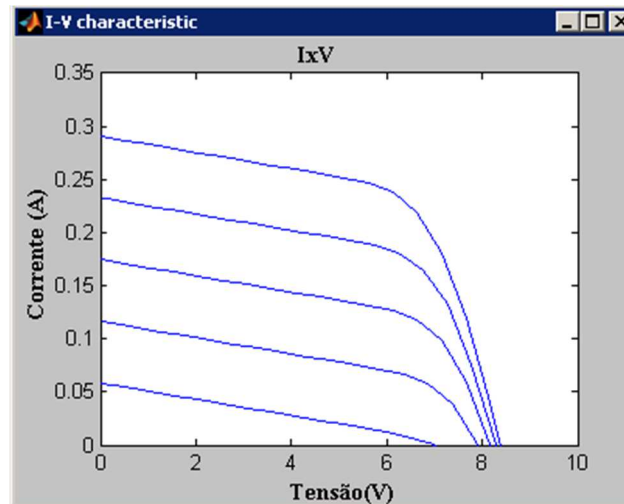
<b>Potência</b>	<b>1.5W</b>
<b>Tensão típica</b>	<b>5.5 V</b>
<b>Tensão em circuito aberto</b>	<b>8.2 V</b>
<b>Tensão máxima potência</b>	<b>6,4 V</b>
<b>Corrente circuito-aberto</b>	<b>300 mA</b>
<b>Corrente típica</b>	<b>270 mA</b>
<b>Dimensões</b>	<b>137x81x2.5(<math>\pm 0,2</math>)mm</b>

O arranjo de células fotovoltaicas do projeto é formado por duas células que foram ligadas em série com o intuito de maximizar a tensão do arranjo minimizando as perdas de potência do sistema.

A seguir, as simulações demonstram o desempenho das células; as simulações foram feitas no matlab/Simulink, e as análises da variação da potência, sobre uma célula fotovoltaica utilizada no projeto, com a variação da irradiação solar.

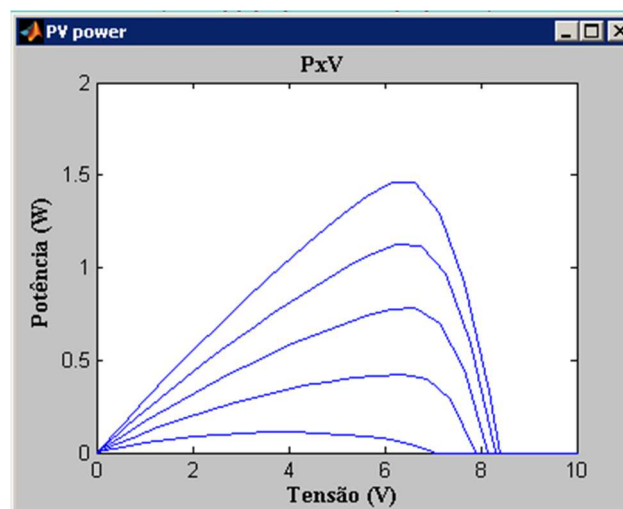
Para a simulação, foi introduzida uma variação na radiação de 1000 a **200  $Wm^{-2}$** , com intervalos de **200  $Wm^{-2}$** . Tomando cinco amostras, é visível a redução da corrente na célula; quanto menor a irradiação sobre a célula, menor é a corrente. Para a irradiação de **1000  $Wm^{-2}$** , quase se alcança a valor nominal que a célula gera.





**Figura 42 – Gráfico de Corrente & Tensão com variação da irradiação.**  
**Fonte: Autoria própria.**

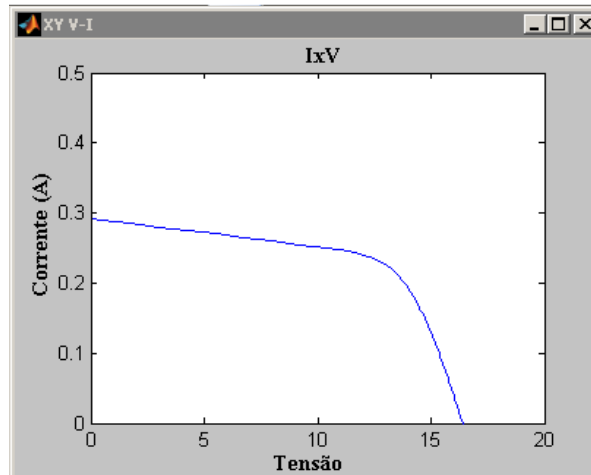
Usando o mesmo princípio, determinamos a potência da célula para várias irradiâncias, sendo a potência máxima atingida pela célula na simulação é de 1.5 W. Esse valor é por célula analisada.



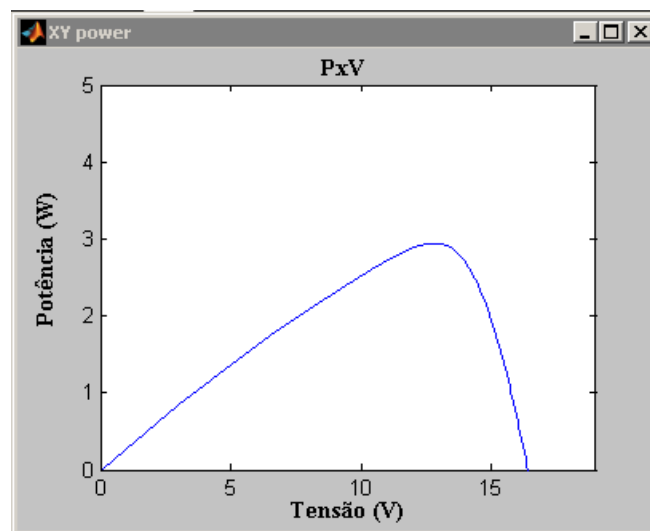
**Figura 43– Gráfico de Potência & Tensão com variação de irradiação.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Para o projeto, o sistema de conversão foi formado de duas células fotovoltaicas ligadas em série; portanto, a corrente máxima do arranjo fotovoltaico será de 0.3 A, o mesmo que de uma única célula, pois a ligação em série favorece o aumento de tensão. A figura 42 representa o gráfico de corrente por tensão gerado pela simulação “A”, feita no simulink/matlab. A mesma consta no anexo C.

A potência do projeto é de, no máximo de 3W A figura 43 demonstra a simulação realizada no simulink/matlab que comprova este valor. Essa simulação consta no anexo C , simulação “A”.



**Figura 44 – Gráfico de Corrente & Tensão para o arranjo de células fotovoltaicas do projeto**  
**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 45 – Gráfico de Potência & Tensão para o arranjo de células fotovoltaicas do projeto .**  
**Fonte: Autoria própria.**

Para a mostrada de dados coletados para o dia 21/04/2013, na localidade de Bagé, Rio Grande do Sul, cidade que possui localização nas seguintes coordenadas: latitude 31°19'53"S e longitude 54°06'25"W.

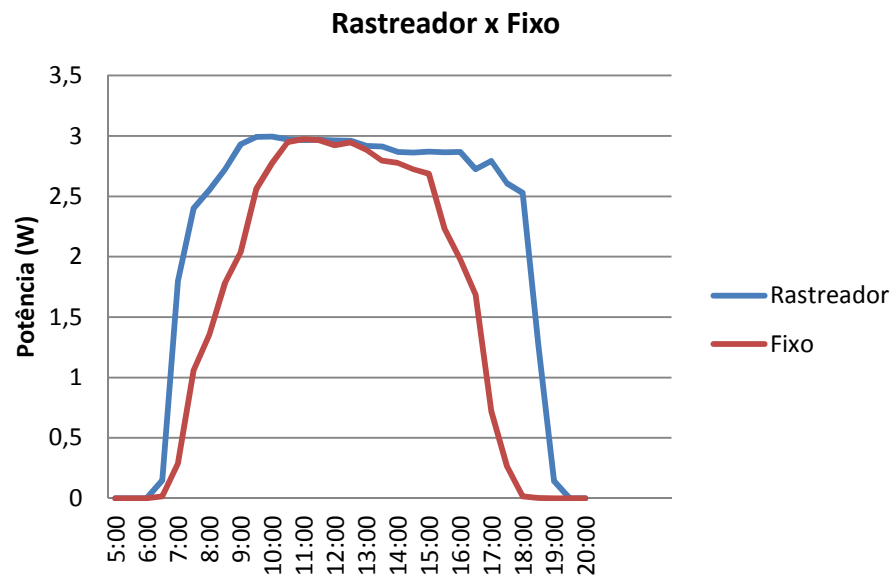
**Tabela 4 - Dados coletados dia 21/04/2013**

Horário	Tensão rastreador solar (volt)	Tensão Sistema Fixo(volt)
5:00	0.00	0.00
5:30	0.00	0.00
6:00	0.17	0.01
6:30	0.75	0.08
7:00	9.00	1.45
7:30	11.07	4.89
8:00	11.39	6.05
8:30	11.53	7.56
9:00	11.87	8.25
9:30	12,11	10.38
10:00	12.13	11.23
10:30	12.03	11.94
11:00	12.01	12.04
11:30	12.02	12.01
12:00	12.00	11.84
12:30	11.98	11.93
13:00	11.81	11.68
13:30	11,79	11.32
14:00	11.61	11.25
14:30	11,59	11.03
15:00	11.62	10.88
15:30	11.60	9.04
16:00	11.61	8.01
16:30	11,64	7.20
17:00	12,09	3.12
17:30	11,80	1.20
18:00	11,71	0.08
18:30	6.02	0.02
19:00	0.79	0.00
19:30	0.00	0.00
20:00	0.00	0.00

**Fonte: Autoria própria.**

Gerando o gráfico dos dados de tensão, fica mais visível observar o aumento na tensão dos módulos fotovoltaicos se comparados com os módulos fotovoltaicos fixos, que estão orientados de acordo com (MAPOTA, 2009), para um sistema fixo com orientação norte e com as coordenadas geográficas de Bagé, Rio Grande do Sul, fixado o ângulo de inclinação das células em 41°.

Com os valores de tensão e corrente no sistema é possível se determinar a potência instantânea que o sistema de conversão está disponibilizando no momento, a figura 46.



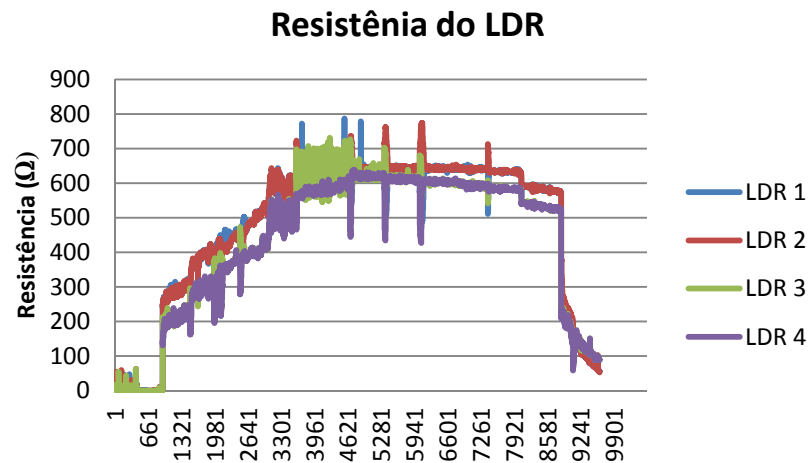
**Figura**  
**Figura 46- Gráfico das potências medidas para o dia 21/04/2013**  
**Fonte: Autoria própria.**

Analisando o desempenho do sistema de rastreamento, foi possível verificar, a partir dos gráficos de potência & tensão, um aumento de 36% na potência gerada pelas células fotovoltaicas. A figura abaixo, representa o posicionamento solar, as 16h10min do dia 20 de abril de 2013, realizado durante a coleta dos dados utilizados para este trabalho.



**Figura 47 - Rastreador Solar**  
**Fonte: Autoria própria.**

Na figura 48 está representada a variação lida na resistência dos LDR's com o tempo de exposição à luminosidade solar.



**Figura 48 - Gráfico dados coletado LDR's sistema de rastreamento solar**  
**Fonte: Autoria própria.**

Analisando o gráfico acima, notamos que por volta do índice de tempo 3545 a 6100 houve passagem de nuvens constante sobre o sistema rastreamento causando uma variação significativa no valor da resistência dos LDR's, mas não havendo variação significativa na tensão medida, de acordo com a figura 48.

A tabela 3 está discriminando os custos do projeto, valores em reais. Os materiais empregados na confecção do protótipo são de fácil acesso, possibilitando a reprodução no mesmo.

**Tabela 3 - Custos do protótipo**

Quant.	Discrição	Valores em Reais
1	Arduino Uno Rev 3	50,00
1	Solar Shild	27,40
8	LDR	12,80
4	Resistor 330 ohm	0,30
1	Diodo 1N4007	0,80
2	Célula Monocristalina 1,5W	28,38
2	Servomotor	40,19
2	Baterias	30,45
1	Sensor de temperatura	5,89
	Acrílico/alumínio/Ferragens	35,00
	Cabos	26,39
	Outros	60,00
	Total	317,59

**Fonte: Autoria própria.**

Este projeto de nível acadêmico, apresentou um custo relativamente baixo com um total de R\$ 317,59 reais, e apresentou satisfatoriamente resultados positivos, tanto quanto ao ganho na potência do sistema de conversão, quanto no sentido de adaptabilidade do sistema de rastreamento.

## 6. CONCLUSÃO

O uso de energias menos poluentes se tornou a questão crucial no combate ao desperdício e uso correto dos recursos naturais. Com isso, faz-se necessário um domínio da tecnologia de processamento de energia fotovoltaica e as instituições de ensino tem por tarefa difundir essa tecnologia em meio à sociedade.

A tecnologia fotovoltaica com rastreo solar em duplo eixo apresenta um aumento de eficiência significativo em termos do aproveitamento da radiação incidente, mostrando-se vantajoso em relação há outras formas de energias renováveis. Possui características que a colocam em vantagem em relação às outras fontes de geração de energia renovável, por apresentar grande confiabilidade e com baixa necessidade de manutenção, o que confere baixos custos de operação, além de ser uma grande vantagem em locais isolados.

Possui também a vantagem de permitir a montagem modular o que lhe permite ser montado por fases, dimensionando o sistema para uma grande variedade de necessidades energéticas, suprimindo as necessidades técnicas de pequenas ou grandes centrais fotovoltaicas como sistemas isolados ou conectado à rede.

Analisando os resultados gráficos obtidos do protótipo, comprova-se o aumento do desempenho do sistema. A estrutura mecânica montada, embora simples, é capaz de permitir um funcionamento adequado do rastreador, demonstrando que um sistema simples pode obter resultados bons.

Por fim, conclui-se que o rastreamento solar se deu de forma satisfatória, mesmo quando havia coberturas de nuvens, pois o sistema funciona sempre que existir presença significativa da luz com diferentes valores nos pares de sensores LDR, e permanecendo parado quando o valor para cada dupla de sensores forem iguais.

E considerando o objetivo principal no início deste trabalho de conclusão do curso de Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente, a saber, o de desenvolver um protótipo de rastreador solar, através de sensores ópticos e controlados por um microcontrolador de baixo custo, e observando os resultados obtidos, relatados e analisados, é possível concluir que o proposto foi alcançado. Espera-se, que essa experiência inspire muitos na busca de novas fontes de energia que fomentem o desenvolvimento sem agredirem o planeta e a vida humana.

## 7. REFERÊNCIAS

ABOUZEID, M. **Use of a reluctance stepper motor for solar tracking based on a programmable logic array (PLA) controller**. Renewable Energy, Alexandria, Egypt, v.23, n.3, p.551-560, 2001.

BECKMAN, W. A.; DUFFIE, J. A. **Solar Engineering of Thermal Processes** . 2. ed. Reino Unido : Wiley, 1980. 469p.

BOUDINOV, H.; GEORGIEV, A.; ROTH, P. **Design and contrition of a system for sun-tracking**. Renewable Energy, Valparaiso , Chile , v.29, n.1010160960148103001964, p.393-402, 2004.

CLIFFORD, M.; EASTWOOD, D. **Design of a novel passive solar tracker**. Solar Energy, Nottingham, Reino Unido, v.77, n.3, p.269-280, 2004.

FRERIS, L.; INFIELD, D. **Renewable Energy in Power Systems** . 1. ed. Reino Unido: Wiley, 2008. 306p.

LIBRA, M.; POULEK, V. **New solar tracker**. Solar Energy Materials and Solar Cells, Prague East Distrit, Czerch Republic , v.51, n.25001, p.113-120, 1998.

MAPOTA, E. F. **Módulo fotovoltaico com seguimento da posição solar**. 2009. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharias ) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa , 2009.

MUHAMMAD, H. R. **Power Electronics Handbook**. 1. ed. Sam Diego, Califórnia - USA : Muhammad H. Rashid, 2001. 893p.

OLIVEIRA, M. M. **Análise do Desempenho De Um Gerador Fotovoltaico com Seguidor Solar Azimutal** . 2008. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul , Porto Alegre , Brasil , 2008.

SABRY, M.; GHETTAS, A.; OLIVEIRA,, C. **V-Trough Concertrador on a Photovoltaic Ful TRanking System in a Hot Desert Climate**. Renewable Energy, Renewable Energy, v.6, n.6, p.527-532, 1995.

VIEIRA, E. A. **MODELAGEM DE UM SISTEMA DE POSICIONAMENTO DE CONVERSÃO SOLAR COM MOVIMENTO VERTICAL** . 2010. 35f. Monografia (Bacharelado em Engenharias) - Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2010.



**Howstuffworks, How Solar Cells Works.** Disponível em:  
<<http://science.howstuffworks.com/solar-cell.htm> > Acesso em: 18 abr. 2013

**Grover Kit.** Disponível em: <[http://www.seeedstudio.com/wiki/index.php?title=GROVE\\_-\\_Starter\\_Bundle\\_V1.0b#Temperature\\_Sensor\\_Twig](http://www.seeedstudio.com/wiki/index.php?title=GROVE_-_Starter_Bundle_V1.0b#Temperature_Sensor_Twig)> Acesso em: 20 abr. 2013

**Nasa, Astronomy Picture of the Day.** Disponível em:  
<<http://apod.nasa.gov/apod/ap100923.html>> Acesso em: 15 abr. 2013

**Power From The Sun .** Disponível em: <<http://www.powerfromthesun.net/index.html>>  
Acesso em: 18 abr. 2013

**Tutorial Aplicações , Funcionamentos e Utilização de Sensores.** Disponível em:  
<[http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000\\_kdr5000/tutorial\\_eletronica\\_-\\_aplicacoes\\_e\\_funcionamento\\_de\\_sensores.pdf](http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf)> Acesso em: 18 fev. 2013

**Arduino, versão básica.** Disponível em: <http://www.arduino.cc> Acesso em 3 de maio 2013

## 8 ANEXO

### 8.1 Anexo A

Programa de controle escrito em C

```

#include <Servo.h>
#include <math.h>
Servo servoRotation;
Servo servoPitch;
//-----
int ldrLeft = 2;
int ldrRight = 1;
int ldrTop = 3;
int ldrDown = 0;
int valRotation = 0;
int valPitch = 180;
//-----LDR -----
int valLeft;
int valRight;
int valTop;
int valDown;
//---- Temperatura----
int valtemp;
int a;
float temperatura;
float resistencia;
int B=3975;
//---- Voltagem ----
//int valV;
//float tempvolt;
//-----
char buffer[10];

void setup ()
{

```

```

servoRotation.attach (8);
servoPitch.attach (10);
Serial.begin(9600);
}

void loop ()
{
  valLeft = analogRead (ldrLeft);
  valRight = analogRead (ldrRight);
  valTop = analogRead (ldrTop);
  valDown = analogRead (ldrDown);

  //_____ temperatura cálculos _____
  a=analogRead(4);
  resistencia=(float)(1023-a)*10000/a;
  temperatura=1/(log(resistencia/10000)/B+1/298.15)-273.15;
  //_____ voltagem _____
  //valV=analogRead(5);
  //tempvolt=valV/4.092;
  //valV=(int)tempvolt;
  //_____

  if(valLeft - valRight > 2 || valLeft - valRight < -2)
  {
    if(valLeft > valRight && valRotation > 0)
    {
      valRotation--;
    }

    if(valRight > valLeft && valRotation < 180)
    {
      valRotation++;
    }
  }

  if(valTop - valDown > 2 || valTop - valDown < -2)
  {

```

```

if(valTop > valDown && valPitch > 0)
{
    valPitch--;
}

if(valDown > valTop && valPitch < 180)
{
    valPitch++;
}
}
servoRotation.write (valRotation);
servoPitch.write (valPitch);
//_____ Saída de dados _____
Serial.print("#S|LOGTEST2[");
Serial.print("L1   ");
Serial.print(itoa(( valLeft ), buffer, 10));
Serial.print("   ");
Serial.print("L2   ");
Serial.print(itoa((valRight ), buffer, 10));
Serial.print("   ");
Serial.print("L3   ");
Serial.print(itoa((valTop ), buffer, 10));
Serial.print("   ");
Serial.print("L4   ");
Serial.print(itoa((valDown ), buffer, 10));
Serial.print("   ");
Serial.print("S1  ");
Serial.print(itoa((valRotation), buffer, 10));
Serial.print("   ");
Serial.print("S2  ");
Serial.print(itoa((valPitch), buffer, 10));
Serial.print("   ");
Serial.print("T   ");
Serial.print(itoa((temperatura), buffer, 10));
//Serial.print("   ");
//Serial.print("V   ");
//Serial.print(itoa((valV), buffer, 10));

```

```
Serial.println(" ]#");  
delay(1000);  
}
```

## 8.2 Anexo B

Diagrama esquemático parte elétrica e controle.

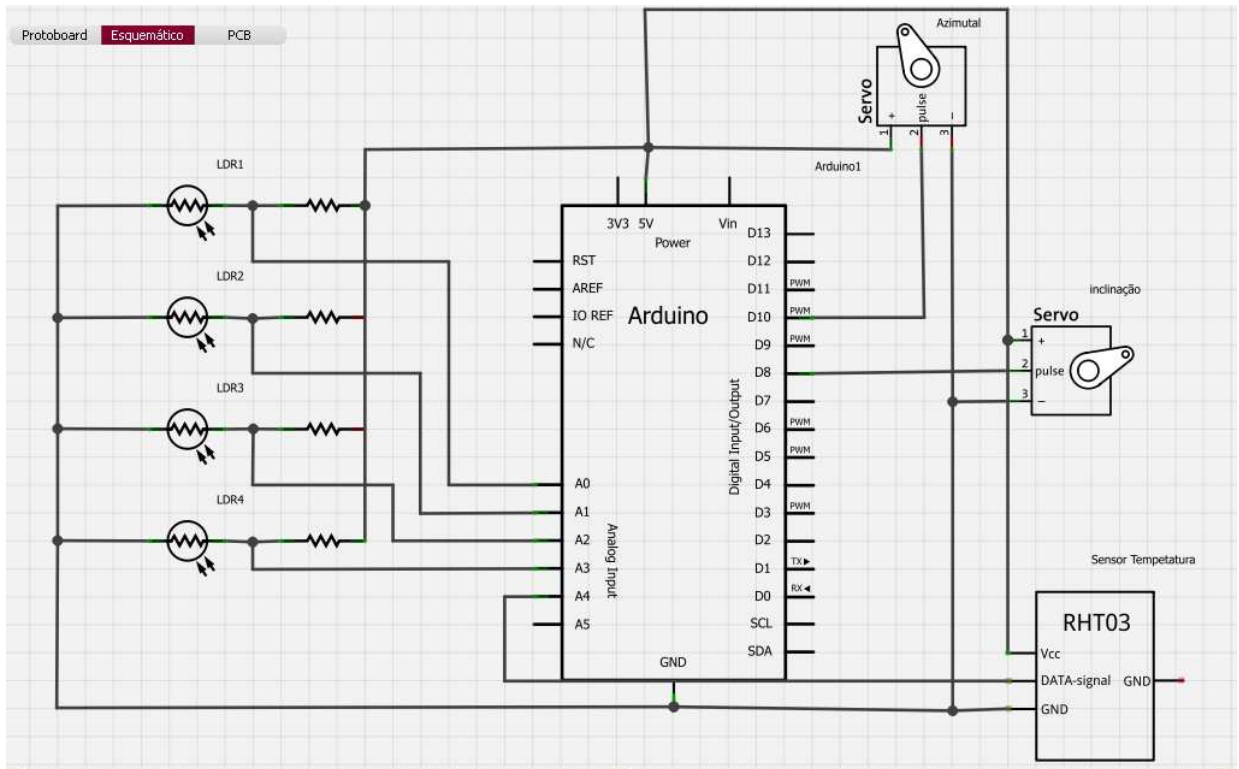
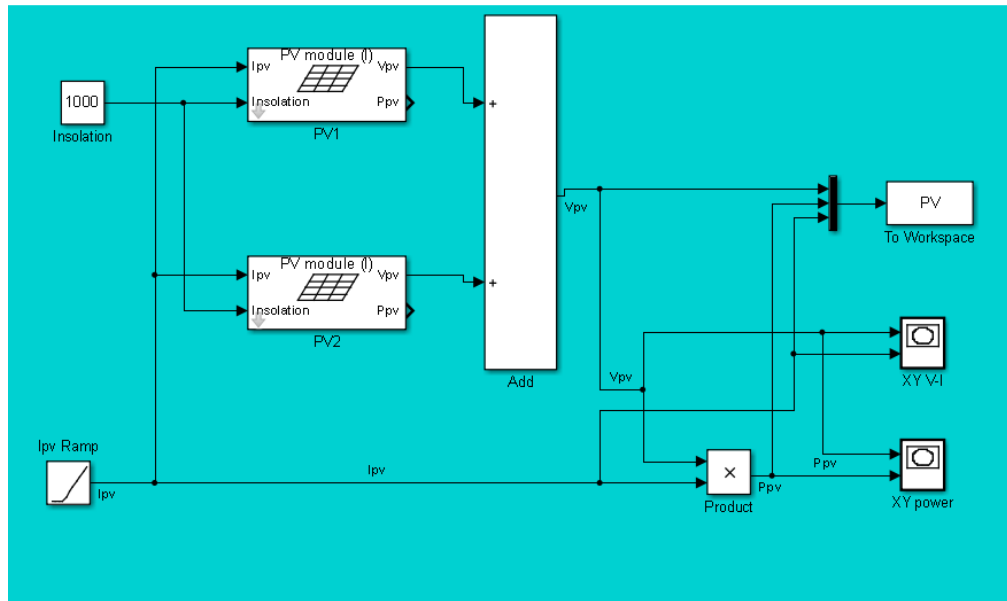


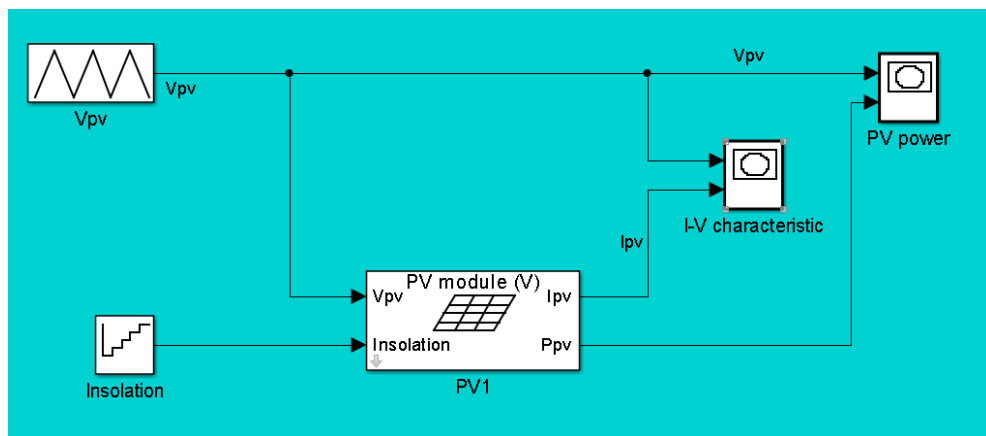
Diagrama esquemático  
Fonte: Autoria própria.

### 8.3 Anexo C

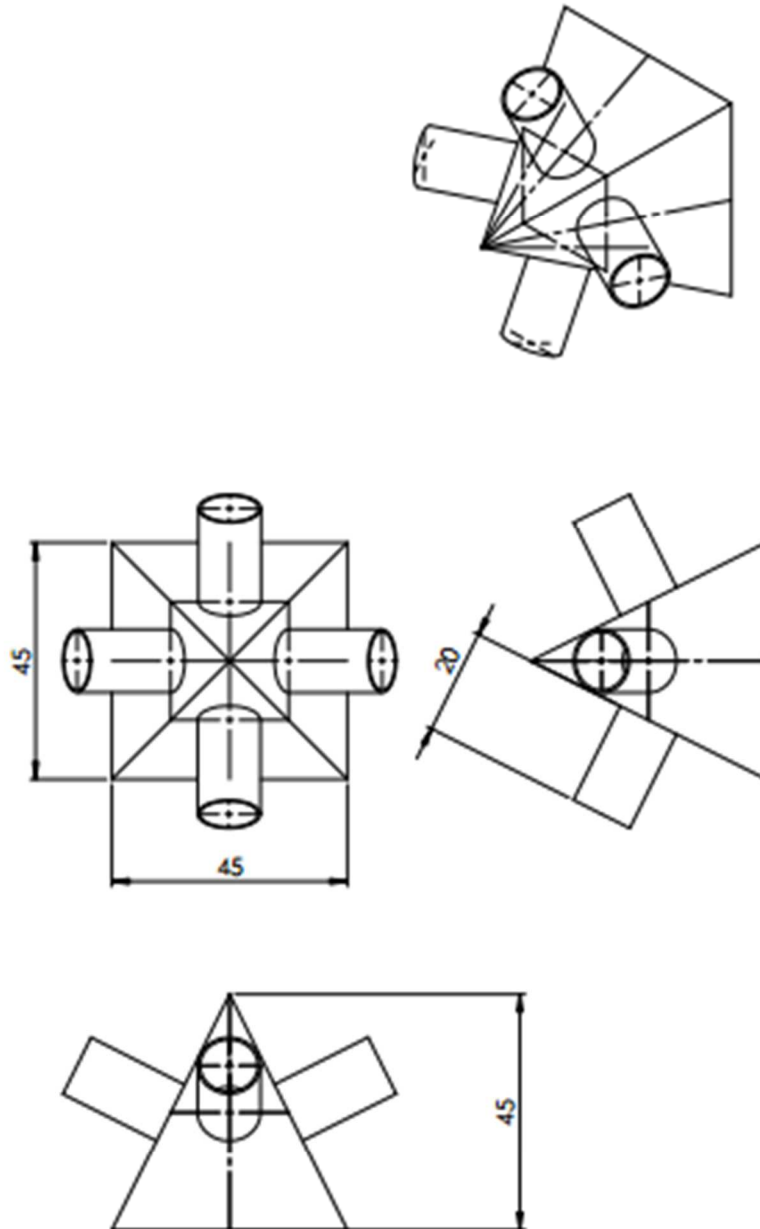
Simulação das células fotovoltaicas, determinação da potência e corrente, usando o SIMULINK/Matlab.



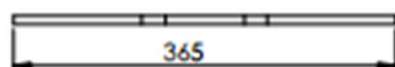
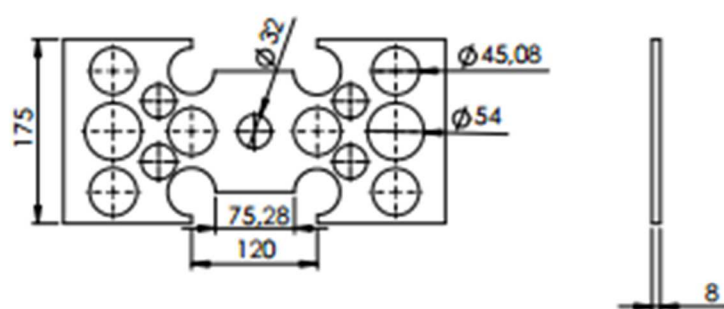
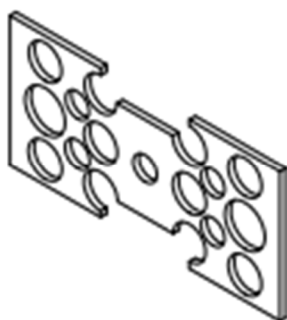
**Simulação "A" do arranjo das células fotovoltaicas.**  
**Fonte: Autoria própria.**



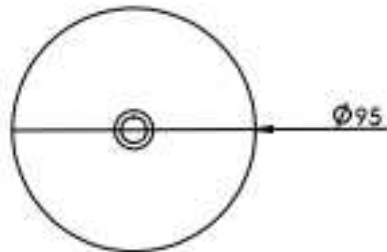
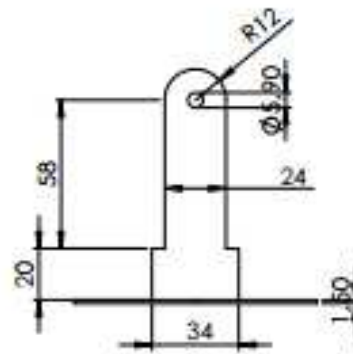
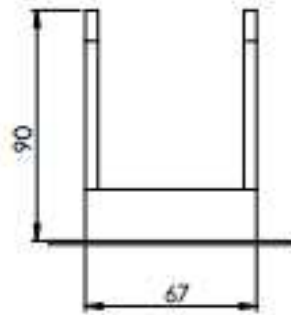
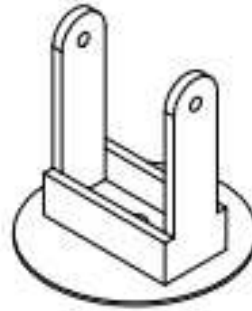
**Simulação "B" células fotovoltaicas com variação da irradiação.**  
**Fonte: Autoria própria.**

**8.4 ANEXO D****VALORES USANDO O SISTEMA DE UNIDADES MMGS****Sensor óptico**

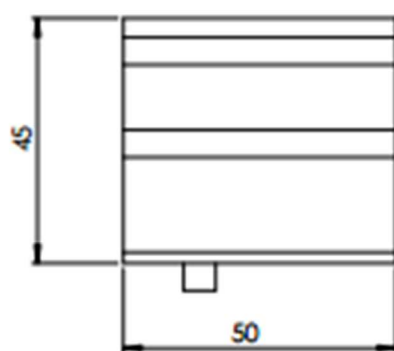
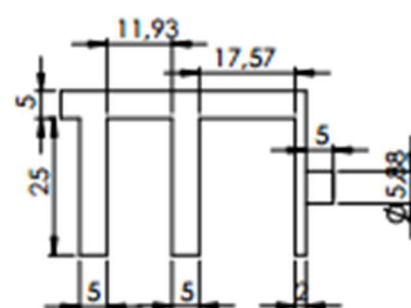
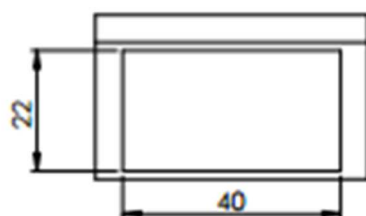
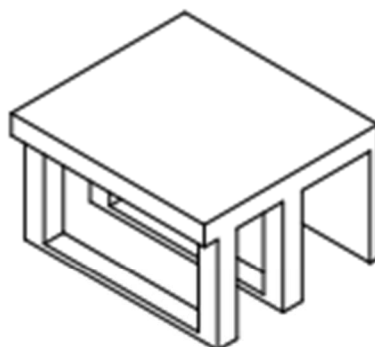




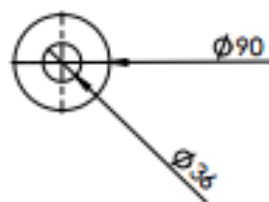
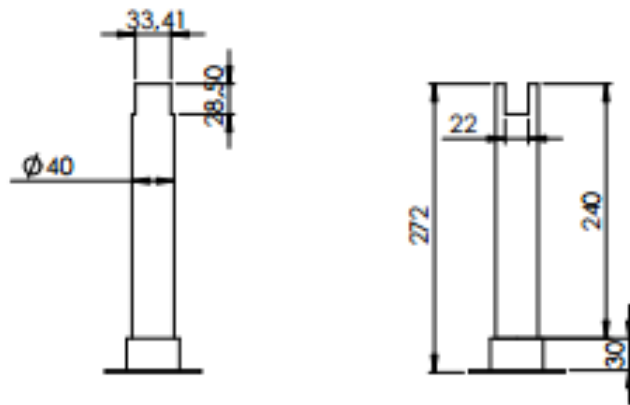
**Suporte células  
fotovoltaicas e  
sensor óptico**



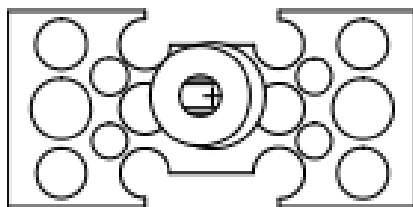
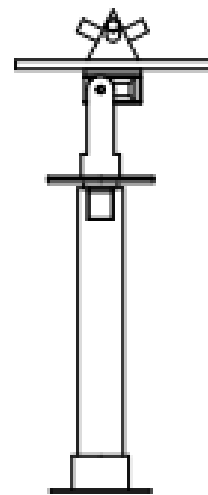
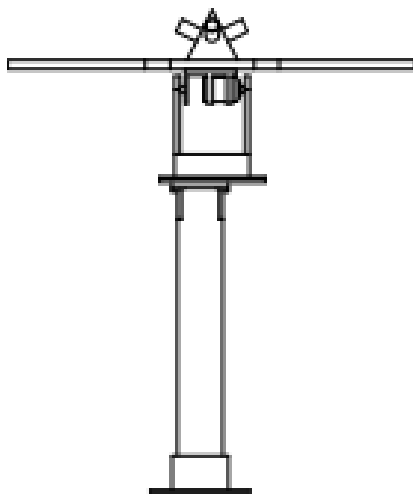
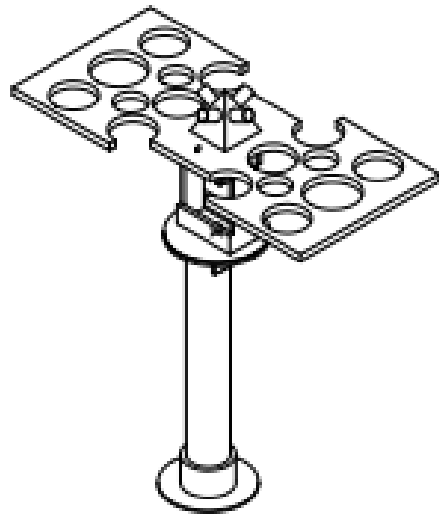
**Base suporte superior  
Servo/Sensor/Célula**



**Suporte servo  
superior**



**Base suporte  
servo inferior**



**Protótipo**