



## CARRO SOLAR COM PAINEL FOTOVOLTAICO ORIENTÁVEL

DOI: 10.19177/rgsa.v9e32020235-254

Thaís Prates<sup>1</sup>  
Cristiano Pauli<sup>2</sup>  
Jorge Luis Palacios Felix<sup>3</sup>

### RESUMO

Considerando a elevada demanda de combustíveis no setor de transportes e a poluição atmosférica produzida por este, no que se refere ao uso de derivados do petróleo como o diesel e a gasolina, observou-se a necessidade da integração de sistemas baseados em energias limpas, que possam ser utilizados na alimentação dos veículos. O estudo buscou construir em escala modelo um carro solar com painel fotovoltaico orientável com o intuito de possibilitar a variação angular e azimutal do mesmo otimizando a geração de energia. A proposta consistiu em se definir ângulos “ideais” de posicionamento do painel considerando a região de estudo, variando-se apenas o desvio azimutal (nascer e pôr do sol). Para verificar a influência do ângulo na geração fotovoltaica três hipóteses foram aventadas, a não utilização de um ângulo, a utilização de um ângulo fixo durante todo o ano e a utilização de um ângulo fixo a cada estação do ano. Foi utilizado um carrinho com motor de corrente contínua e um painel fotovoltaico de 6 volts fixado sobre um suporte orientável. Com base nos resultados foi possível observar que variar o ângulo de instalação dos painéis fotovoltaicos conforme cada estação do ano pode aumentar até 20% a geração de energia anual. A eficiência do uso do ângulo ideal também foi comprovada mediante ao melhor desempenho do veículo frente ao uso deste onde se pôde atingir uma velocidade média cerca de 7% superior que a velocidade obtida com o uso do painel a 0° e 4% com o uso do painel a 22°.

**Palavras-chave:** Energia fotovoltaica. Carro com energia solar. Suporte solar orientável.

<sup>1</sup> Acadêmica do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária - UFFS, RS, Campus Cerro Largo. E-mail: thaisprates@gmail.com

<sup>2</sup> Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária - UFFS, RS, Campus Cerro Largo. E-mail: crauberpauli@yahoo.com.br

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (2002); Professor da Universidade Federal da Fronteira Sul, Brasil. E-mail: jorge.felix@uffs.edu.br

# SOLAR CAR WITH ORIENTING PHOTOVOLTAIC PANEL

## ABSTRACT

Considering the high demand for fuels in the transportation sector and the atmospheric pollution produced by this, regarding the use of petroleum products such as diesel and gasoline, it was observed the need to integrate clean energy systems, that can be used to power vehicles. The study sought to build a model-scale solar car with an adjustable photovoltaic panel, in order to enable its angular and azimuthal variation, optimizing power generation. The proposal was to define "ideal" panel positioning angles considering the study region, varying only the azimuthal deviation (sunrise and sunset). To verify the influence of the angle on the photovoltaic generation three hypotheses were made, non-use of an angle, use of a fixed angle throughout the year and use of a fixed angle each season. A DC (direct current) motor trolley and 6-volt photovoltaic panel mounted on a swiveling bracket were used. Based on the results it was observed that varying the installation angle of photovoltaic panels according to each season can increase up to 20% annual energy generation. The efficiency of the use of the ideal angle has also been proven by the better performance of the vehicle compared to its use where it can reach an average speed about 7% higher than the speed obtained by using the dashboard at 0° and 4% with the use. the panel at 22°.

**Keywords:** Photovoltaics. Solar powered car. Solar support. Swivel.



## 1 INTRODUÇÃO

Os meios de transporte têm um papel fundamental na sociedade, ao transporte de pessoas, animais, mercadorias, alimentos e muitas outras coisas, sendo uma peça fundamental para o desenvolvimento do país. No Brasil a maior parte da frota de veículos possui motores a combustão e são alimentados por combustíveis fósseis. Estes combustíveis não são renováveis e sua queima libera grandes quantidades de dióxido de enxofre, responsável pela chuva ácida, dióxido de carbono, precursor do efeito estufa e diversos outros contaminantes emitidos que originam riscos à saúde humana e ao meio ambiente (GUARIEIRO et al., 2011).

Os veículos elétricos são definidos como veículos automotores que utilizam pelo menos um motor elétrico no acionamento das rodas. A maioria dos modelos utilizam baterias para armazenar energia e estas acabam encarecendo o veículo. Vale-se ressaltar que nos últimos anos houve grandes avanços nas tecnologias automotivas e nas baterias, assim os carros elétricos de alto desempenho podem em breve tornar-se uma opção para compradores em todo o mundo (BEAUME; MIDLER, 2009).

Estes tipos de veículos podem ser alimentados por qualquer fonte energética, e quando associados às energias renováveis podem se enquadrar como uma das alternativas mais viáveis para solucionar a problemática causada pelas emissões atmosféricas. Considerando que a energia solar incidente no planeta equivale a 166.000 TW, cerca de 85.000 TW estão disponíveis para serem utilizados, valor este, superior a qualquer outra fonte de energia renovável no mundo (ABBOTT, 2010).

A geração fotovoltaica ainda é uma tecnologia cara, dependendo da sua aplicação, de forma que mesmo em sistemas relativamente pequenos, na maioria das vezes há vantagem econômica na utilização de rastreadores solares devido a influência do ângulo de instalação dos painéis fotovoltaicos no processo de conversão de energia (BIONE et al, 2004).

Diante disto, a proposta deste projeto foi determinar os ângulos ideais de geração respectivos a cada estação do ano na região em estudo, e posteriormente, elaborar um modelo de veículo elétrico integrado a um sistema fotovoltaico, utilizando este como fonte de alimentação do motor. A disposição do painel solar fotovoltaico sobre o veículo foi realizada por meio de um suporte móvel, a fim de possibilitar a variação angular e azimutal do painel que permita às mudanças angulares ideais a cada período do ano, proporcionando a otimização da conversão da radiação solar em energia elétrica.



## 2 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo foi sugerir uma proposta para aumentar a geração de energia dentro do PV para sua posterior aplicação em veículos elétricos, visando aumentar o uso desta tecnologia em uma aplicação para minimizar futuramente as emissões atmosféricas geradas pelo uso de combustíveis fósseis.

## 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Para efeitos de estudo é impreterível, a definição de alguns parâmetros acerca da energia solar e dos veículos elétricos, desta forma o estado da Arte do presente trabalho apresenta duas seções distintas. A primeira seção aborda a problemática envolvendo o uso de combustíveis fósseis e apresenta como solução a estes o uso de energias renováveis como a energia fotovoltaica. Na segunda seção são

apresentados os conceitos mais importantes acerca da energia fotovoltaica, o efeito fotoelétrico e o comportamento dos painéis fotovoltaicos.

### 3.1 COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS E ENERGIAS RENOVÁVEIS

O principal componente da matriz energética mundial é o petróleo, que consiste em um combustível fóssil cujas reservas são insuficientes para manter o suprimento nas próximas quatro décadas (LIMA et al., 2008).

As energias renováveis podem ser consideradas uma solução interessante para amenizar a dependência mundial do petróleo e as questões ambientais acerca da poluição atmosférica. Este tipo de energia vem crescendo na utilização em veículos no mundo todo. Para fazer o uso desta energia em veículos automotores é necessário que estes sejam compatíveis com a fonte de energia gerada, assim pesquisadores de todo o mundo vem desenvolvendo tecnologias para veículos alternativos, como veículos elétricos, buscando fazer com que estes atendam ou superem as qualidades dos veículos convencionais. Nessa busca muitas das tecnologias existentes ganharam seu espaço, principalmente a energia solar fotovoltaica aplicada em tecnologias automotivas (BITTENCOURT et al., 2017).



### 3.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia fotovoltaica é gerada através da conversão direta da radiação solar em eletricidade, por meio de células fotovoltaicas. Essas células são construídas com materiais semicondutores que são responsáveis por criar o efeito fotoelétrico, gerado através da absorção da radiação solar ocasionando uma diferença de potencial na estrutura do material contido na célula gerando uma corrente elétrica (SWART, 2011).

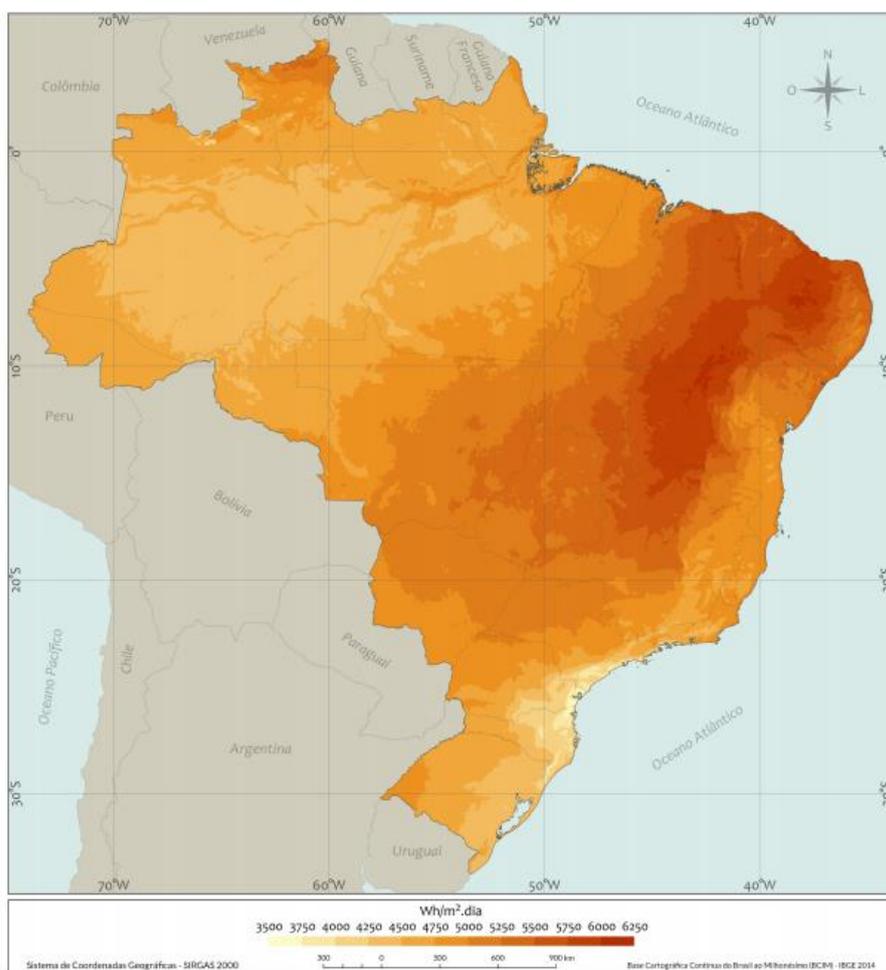
Estes materiais semicondutores apresentam um aumento da sua condutividade com a temperatura, de forma que, na presença de calor ocorre à excitação térmica destes portadores da banda de valência para a banda de condução, esta característica dos semicondutores possibilita que fótons, na faixa do visível, consigam excitar os elétrons à banda de condução. Além deste efeito, para o funcionamento das células fotovoltaicas é necessária uma estrutura apropriada para a coleta dos elétrons excitados gerando assim uma corrente. Ressaltando-se que as células fotovoltaicas

não são capazes de armazenar a energia elétrica, sua função é apenas manter o fluxo de elétrons no circuito elétrico conforme a incidência solar (SWART, 2011).

### 3.2.1. Energia Solar no Brasil

O Brasil é um país que possui grande potencial de aproveitamento energético fotovoltaico, pois recebe durante todo o ano grandes quantidades de irradiação solar. Mesmo a região sul do país, que tem por característica meses de extremo inverno, apresenta bons índices de irradiação ao longo do ano com valores médios compreendidos entre 4,0 e 5,25 kWh/m<sup>2</sup>, conforme podemos observar na Figura 1 (INPE, 2017).

Figura 1. Média anual do total diário de irradiação solar



Fonte: INPE, 2017.

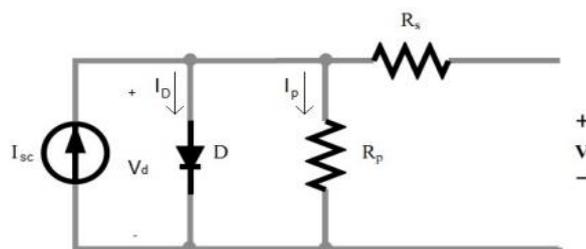
Segundo o Atlas solar do Rio Grande do Sul (2018), o território gaúcho recebe diariamente cerca de 4,67 kWh/m<sup>2</sup>, radiação superior a países como a Alemanha, que exploram muito o potencial solar na sua matriz energética. Contudo, mesmo com o alto potencial brasileiro, a fonte de energia que tem sua maior representatividade no

país são as fontes hídricas, que constituem 60,0% da matriz elétrica nacional, enquanto a geração fotovoltaica dos sistemas interligados à rede elétrica representa apenas 1,5% (ABSOLAR, 2020).

### 3.2.2. Curva Característica

As células que constituem um painel fotovoltaico são formadas por junções de pastilhas de valência positiva e negativa, que quando expostas à luz liberam elétrons em circuito elétrico fechado, assim o conjunto destas células presente nos módulos fotovoltaicos podem ser representados através de um circuito equivalente, que possibilita descrever o comportamento elétrico do painel. O circuito equivalente de uma célula fotovoltaica é apresentado na Figura 2 e permite que através de determinadas equações e análise de gráficos obtenham-se os parâmetros elétricos da placa (NETO, et al 2017).

Figura 2. Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica



Fonte: CORTEZ, 2013.

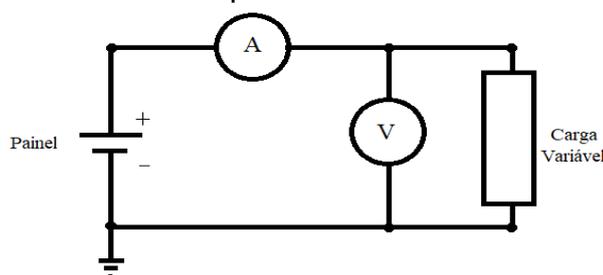
No circuito  $I_D$  corresponde a corrente fotogerada,  $R_s$  e  $R_p$  são as resistências em série e paralelo, enquanto  $V$  representa a tensão de saída da célula. Diante deste modelo William Bradford Shockley, desenvolveu a equação do diodo ideal, representada pela equação 1. Esta equação descreve o desempenho de geradores fotovoltaicos, relacionando tensão, corrente, intensidade solar e temperatura, onde  $I_D$  corresponde a corrente fotogerada dada em amperes,  $I_0$  a corrente de saturação reversa também dada em amperes,  $n$  corresponde ao fator de idealidade do diodo obtido experimentalmente,  $q$  equivale a carga do elétron,  $k$  é a constante de Boltzmann,  $T$  a temperatura absoluta dada em Kelvin, e  $R_s$  e  $R_p$  as resistências em série e paralelo respectivamente (PINHO; GALDINO, 2014).

$$I = I_D - I_0 \left[ \exp \left( qV + \frac{IR_s}{nkT} \right) - 1 \right] - \left[ \frac{V + IR_s}{R_p} \right] \quad (\text{Equação 1})$$

Os painéis fotovoltaicos podem ser descritos de maneira mais compreensível através de suas curvas características que contêm os valores de corrente elétrica e tensão que o painel fornece em determinadas condições de temperatura e radiação. Através destas curvas podem-se identificar os valores máximos de corrente, tensão e potência que o painel pode atingir. A construção destas é elaborada através de ensaios em laboratório onde, se traçando as curvas para as condições reais de temperatura ambiente e radiação solar, são possíveis determinar os valores de corrente, tensão e potência que o mesmo fornece garantindo a eficiência do processo de conversão de energia (REZENDE; GUIMARÃES, 2012).

A obtenção do modelo do circuito equivalente pode ser realizada por um processo manual, medindo-se a tensão e corrente do painel alterando a carga do mesmo em outro tipo de circuito conforme ilustrado na Figura 3. Dentre os principais parâmetros elétricos das placas fotovoltaicas podemos destacar a tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito, potência elétrica, fator de forma e eficiência. A tensão de circuito aberto corresponde à tensão entre os terminais de uma célula quando não há corrente elétrica circulando por este e equivale a máxima tensão que a célula pode produzir. A corrente de curto circuito representa a máxima corrente que se pode obter na célula. A potência elétrica corresponde ao produto da tensão e corrente gerada pelo módulo. O fator de forma é a razão entre a máxima potência gerada pela célula e o produto da corrente de curto circuito pela tensão. Quanto melhor a qualidade das células no módulo, mais próxima da forma retangular será a curva (NETO et. al., 2017).

Figura 3 - Circuito aplicado para a construção da curva característica do painel fotovoltaico

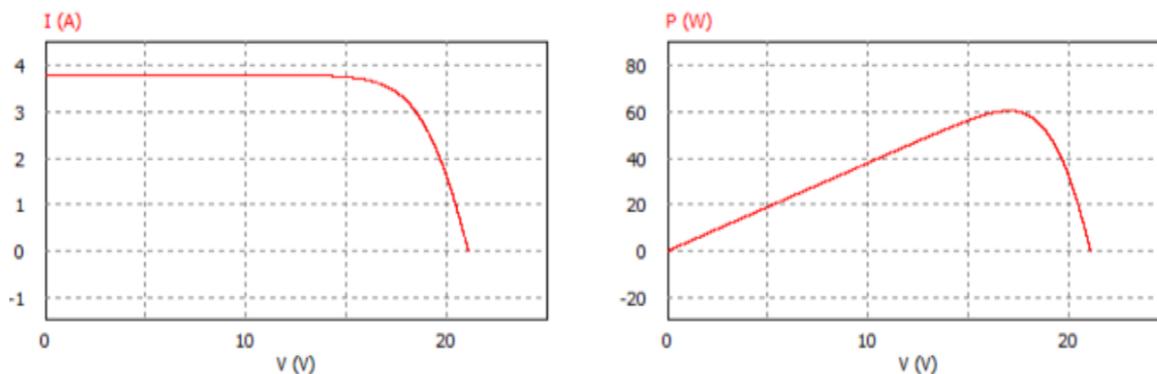


Fonte: Adaptado de NETO et al., 2017.

A curva característica possui dois modelos: corrente x (versus) tensão e potência x (versus) tensão. Destas obtém-se o comportamento do painel fotovoltaico que sofre alterações conforme a radiação e a temperatura que está sendo

submetido. Na Figura 4 podem se observar as curvas características de um painel de 230 Wp, para a radiação de 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura de 25°C.

Figura 4. Curvas características dos Painéis Fotovoltaicos



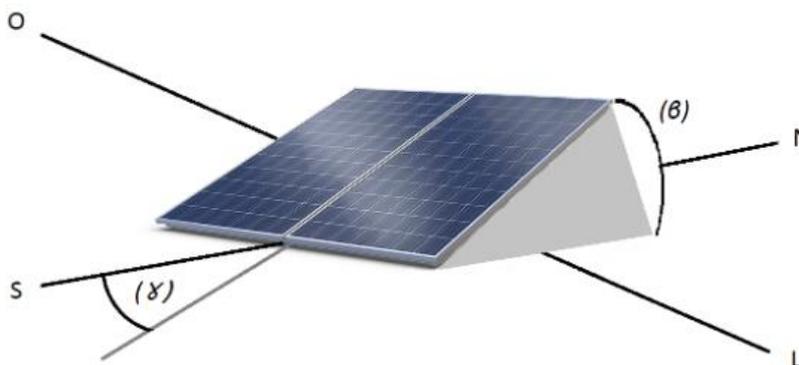
Fonte: CORTEZ, 2013.

### 3.2.3. Eficiência dos Painéis Solares Fotovoltaicos

A eficiência dos painéis fotovoltaicos depende de diversos aspectos dentre os quais estão à qualidade das células fotovoltaicas e a intensidade de radiação solar incidente sobre estas. Considerando os movimentos de translação e rotação da Terra é possível concluir que a superfície recebe radiação solar com ângulos de incidência diferentes, segundo a hora do dia e a época do ano, além de se modificar de acordo com a orientação do plano, assim pode-se concluir que o processo de conversão de energia nas células fotovoltaicas é dependente da radiação incidente sobre elas (PINHO; GALDINO, 2014 e SWART, 2011).

É de extrema importância que se conheça a relação de ângulos formados entre a posição aparente do Sol no céu e as coordenadas na superfície terrestre. Os ângulos de maior importância acerca deste estudo são o ângulo azimutal ou desvio azimutal ( $\gamma$ ) e o ângulo da superfície de captação ( $\beta$ ), apresentados na Figura 5. O desvio azimutal trata-se do ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul (horizonte do observador) variando entre  $-180^\circ$  e  $180^\circ$ . O ângulo da superfície de captação trata-se do ângulo entre o plano da superfície do painel fotovoltaico e o plano horizontal variando entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$  (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 5. Ângulos de posicionamento de uma superfície solar



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Considerando que os painéis fotovoltaicos têm pouca eficiência na transformação de energia solar em elétrica, deve-se buscar alternativas para otimizar este processo. Instalar de forma que o ângulo entre a incidência dos raios solares e a superfície da placa fotovoltaica seja o mais próximo de  $90^\circ$ , que é o ângulo necessário para o maior aproveitamento na captação desta energia (BITTENCOURT et al., 2017).

#### 4 METODOLOGIA



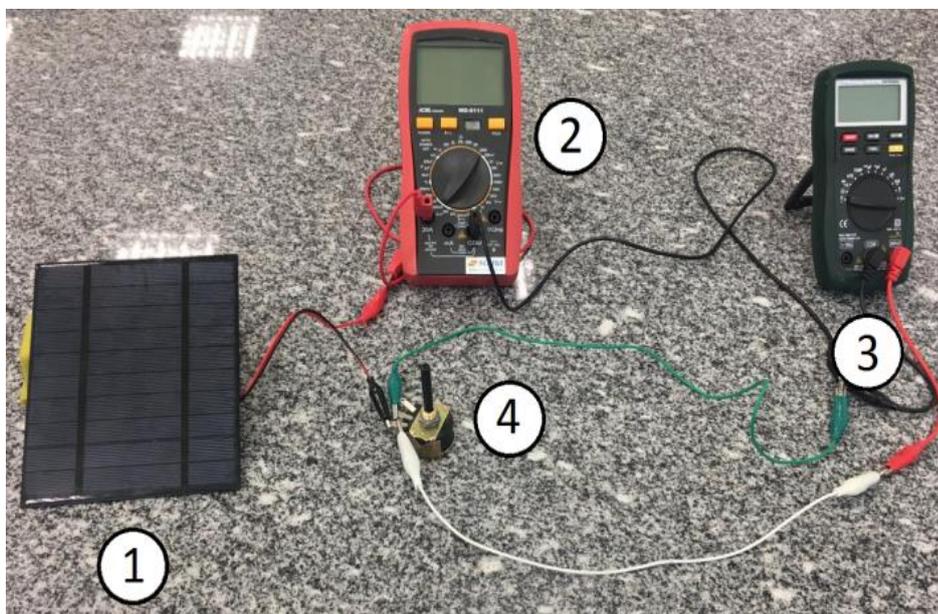
Esta pesquisa foi desenvolvida no laboratório de eletromagnetismo e na área livre externa do campus da Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, Rio Grande do Sul (latitude  $28^\circ 9' 2''$  S e longitude  $54^\circ 44' 19''$  W). O trabalho foi desenvolvido em partes, que funcionam integradas permitindo o correto desempenho do veículo. Estas partes contemplam a caracterização do painel fotovoltaico, a construção do modelo de veículo elétrico (pequena escala) e do suporte orientável, a definição dos ângulos de estudo, a verificação da influência do ângulo do painel na geração fotovoltaica e verificação da eficiência do uso do ângulo ideal.

##### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PAINEL FOTOVOLTAICO

A caracterização do painel fotovoltaico foi realizada através da construção de sua curva característica. Nesta, utilizou-se a metodologia de PINHO e GALDINO (2014), que consistiu na montagem de um circuito apresentado na Figura 3, utilizando o painel, amperímetro, voltímetro e um potenciômetro de  $500 \Omega$  de resistência total. Um multímetro foi conectado em série com a placa fotovoltaica medindo a corrente da placa, e um segundo multímetro foi conectado em paralelo a placa medindo a

voltagem. Após conectou-se o potenciômetro em paralelo a placa, para funcionar como uma carga variável.

Figura 6 – Circuito utilizado para a construção da curva característica, (1) Painel Fotovoltaico 6 V, (2) Amperímetro, (3) Voltímetro e (4) Potenciômetro 500  $\Omega$ .



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Após montado o circuito, realizou-se o experimento a campo entre 10 e 11 horas da manhã. Partindo do potenciômetro com carga nula, variou-se até o máximo a carga deste, registrando-se os valores de tensão e corrente respectivas às diversas cargas variadas no potenciômetro. Com o auxílio do SCILAB construíram-se duas curvas, uma referente à tensão versus corrente e outra referente à tensão versus potência.

$$P = VI \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$V$  = Tensão (V);

$I$  = Corrente (A);

Para a determinação da potência e fator de forma utilizou-se as equações 2 e 3. Os valores de tensão máxima de pico ( $V_{mp}$ ) e corrente máxima de pico ( $I_{mp}$ ) foram aferidos a partir o gráfico de tensão e corrente.

$$FF = \frac{V_{mp}I_{mp}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$V_{mp}$  = Tensão de máxima de pico (V);

$I_{mp}$  = Corrente de máxima de pico (A);

$V_{oc}$  = Tensão de circuito aberto (V);

$I_{sc}$  = Corrente de curto circuito (A);

Para o cálculo da eficiência utilizou-se a equação 4, que relaciona a corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto, fator de forma, área da placa fotovoltaica inferida a partir das dimensões disponibilizadas pelo fabricante correspondente a 130 mm de largura e 150 mm de comprimento, e a irradiância solar incidente que usualmente assume o valor de 1367 W/m<sup>2</sup>.

$$\eta = \frac{(I_{sc}V_{oc}FF)100\%}{AG} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

$I_{sc}$  = Corrente de curto circuito (A);

$V_{oc}$  = Tensão de circuito aberto (V);

$FF$  = Fator de forma;

$A$  = Área da placa fotovoltaica (m<sup>2</sup>);

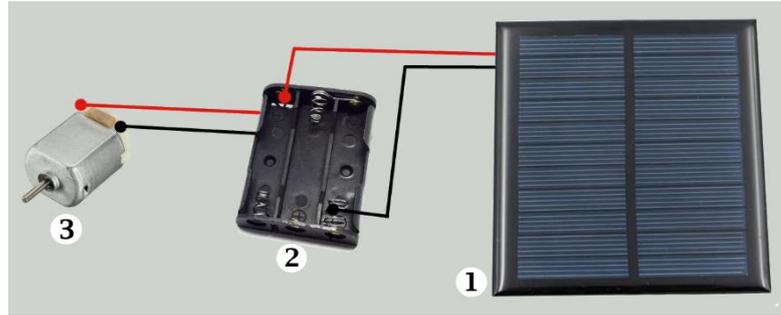
$G$  = Irradiância solar incidente (W/m<sup>2</sup>);



## 4.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO E SUPORTE ORIENTÁVEL

Na construção do modelo de veículo utilizou-se um motor de corrente contínua (DC) com operação de 6 volts, compatível com a potência gerada pelo painel. Este motor estava inserido em uma carcaça de “carrinho” de controle remoto a pilhas, facilitando os aspectos construtivos do projeto visto que o esquema elétrico do modelo não precisou ser significativamente alterado. O painel fotovoltaico, inicialmente, apenas substitui as pilhas do circuito. O polo positivo do painel foi ligado à placa positiva do suporte das pilhas e o polo negativo do painel a placa negativa do suporte das pilhas. A Figura 7 é uma mera representação do esquema de funcionamento do circuito, bem como suas ligações elétricas.

Figura 7 – Representação da ligação do painel ao motor, (1) Painel, (2) Alojamento das pilhas, (3) Motor responsável pelo movimento do carrinho.

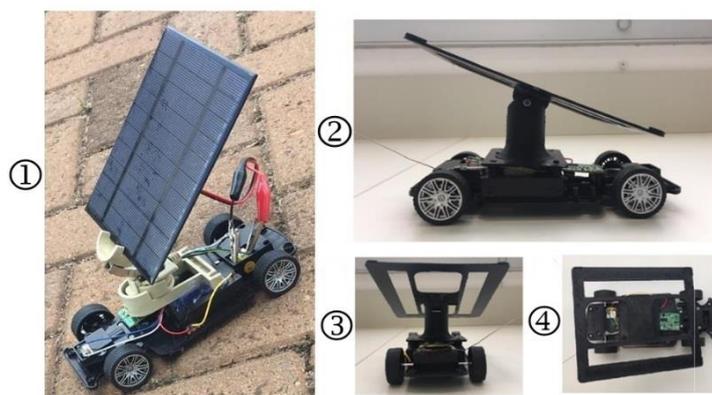


Fonte: Elaborado pelos Autores, 2019.

O mini painel solar fotovoltaico utilizado para suprir energeticamente o motor possui dimensões de 150 x 130 mm, e fornece 6 V de tensão, 2.5 W de potência e 0.5 A de corrente. Este foi acoplado sobre a carcaça do modelo por meio de um suporte. Inicialmente o suporte foi confeccionado com materiais plásticos de sucata, porém, este suporte apresentou alguns problemas quanto ao movimento adequado do painel. Optou-se então em desenhar outro suporte em software de desenho tipo CAD e imprimi-lo via impressora 3D em plástico ABS. Este suporte é composto por uma base móvel articulada que possibilita dois tipos de movimentos de rotação nos eixos X e Y, ou ângulos  $\gamma$  e  $\beta$ . A combinação dos movimentos nestes dois eixos fornece amplitude de movimento suficiente para alcançar as posições necessárias para “encontrar o sol”.



Figura 8 – (1) Modelo inicial, (2) (3) e (4) Vistas lateral, traseira e superior do modelo final, respectivamente.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

#### 4.3 DETERMINAÇÃO DOS ÂNGULOS DE ESTUDO

Para verificar a influência do ângulo no processo de geração fotovoltaica três hipóteses foram aventadas, com o objetivo de avaliar:

- Não utilização de ângulo;
- Utilização de ângulo fixo durante todo o ano;
- Utilização de ângulo fixo a cada estação do ano;

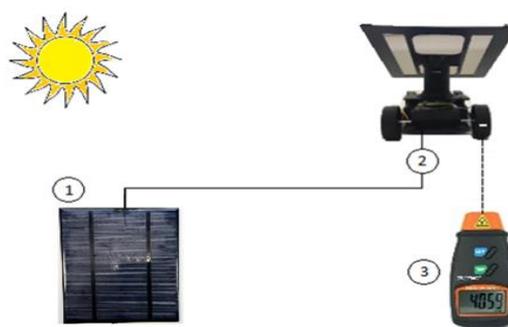
Na primeira hipótese o ângulo avaliado será o de 0°, na segunda hipótese o ângulo de 22° (maior média anual de irradiação solar no Município em estudo), segundo o CRESESB (Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sergio Silva Brito). Na terceira hipótese, para se definir os ângulos ideais respectivos as estações do ano para a região em estudo, utilizou-se o Software Radiasol 2 (software livre, baseado em imagens de satélite, desenvolvido pela (UFRGS)). Além disso, este software também foi utilizado para construir o gráfico comparativo entre as hipóteses.

#### 4.4 VERIFICAÇÃO DA EFICIENCIA DO USO DO ÂNGULO IDEAL

A verificação da eficiência do uso do ângulo ideal foi realizada experimentalmente com base no desempenho do motor, avaliando-se sua rotação livre frente ao uso dos ângulos em estudo. Este experimento foi realizado a campo, ao longo de um dia num período compreendido entre as 9h e 16h. As medidas foram realizadas de hora em hora com o uso de um tacômetro digital a laser, registradas em valores de rpm e posteriormente convertidas para velocidade em m/s.



Figura 9 – Experimento para medir a rotação do motor. (1) Painel Fotovoltaico, (2) Conexão painel-motor, (3) Tacômetro Digital



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Para efetuar as medições fixou-se uma fita reflexiva na roda do modelo, a reflexão dos raios laser emitidos sob a fita reflexiva possibilita a obtenção dos valores de rpm. Na presença de muita luz as leituras do tacômetro são afetadas, fato que fez com que o modelo e o tacômetro ficassem alojados na parte interna do laboratório e somente o painel fosse instalado na parte externa, recebendo diretamente a radiação

solar, conforme ilustrado na Figura 9. A energia gerada pelo painel foi transportada através de cabos até o motor elétrico do modelo. As angulações correspondentes foram analisadas simultaneamente sob as mesmas condições de radiação e temperatura.

Registrado os valores referentes à velocidade rotacional do motor ( $x$ ), converteram-se estes para valores de velocidade angular ( $\omega$ ). A velocidade angular é dada em radianos por segundo (rad/s) e consiste em uma grandeza muito importante para os estudos de giro de motores, esta medida expressa o valor da medida do arco de circunferência descrito por um objeto dentro e um intervalo de tempo e pode ser expressa conforme a equação 5, onde  $x$  representa o número de rotações por minuto do motor.

$$\omega = \frac{x}{60} \times 2\pi \quad (\text{Equação 5})$$

Contudo, considerado que esta análise é feita acerca de um veículo, convertamos o valor de velocidade angular ( $\omega$ ) para termos de velocidade linear ( $v$ ). A velocidade linear ( $v$ ) ou escalar como é comumente chamada, pode ser expressa pelo produto da velocidade angular e raio da roda ligada ao eixo do motor, conforme a equação 2, expressa em unidade de m/s (Sistema Internacional de Unidades).



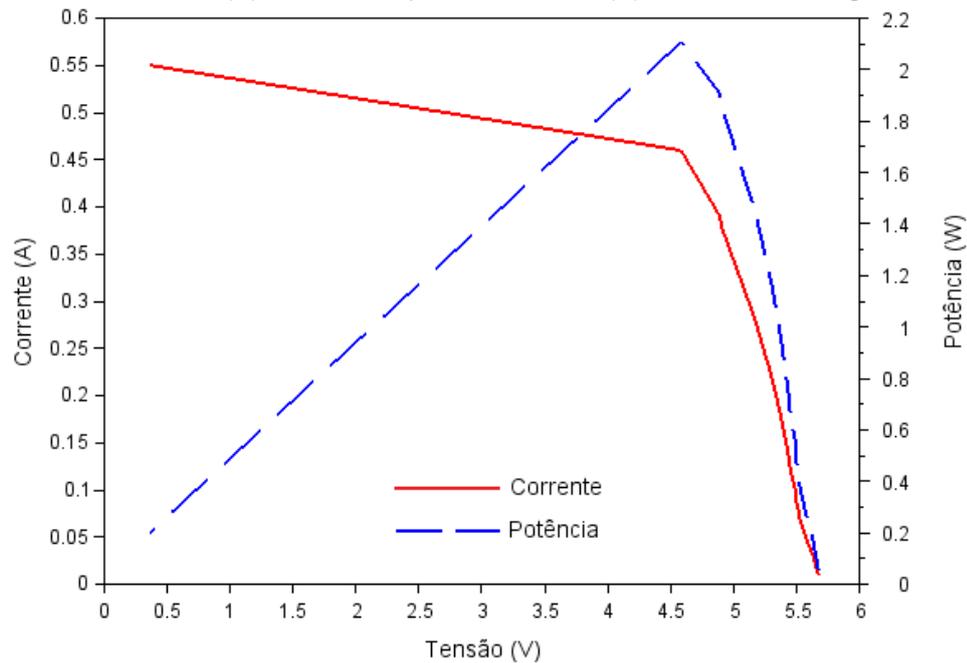
$$v = \omega \cdot r \quad (\text{Equação 6})$$

As velocidades rotacionais, angulares e lineares estão apresentadas no quadro 1 para cada ângulo de inclinação respectivo a cada hora do dia experimentada, assim como as velocidades médias obtidas com o uso de cada um dos ângulos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos acerca da caracterização da curva característica foram satisfatórios, estando de acordo com a literatura. A Figura 10 mostra a curva característica  $V \times I$  (tensão x corrente) associada a curva de  $V \times P$  (tensão x potência), sob condições de campo, onde foi obtida a tensão máxima de pico ( $V_{mp}$ ) de 4,58V, corrente máxima de pico ( $I_{mp}$ ) de 0,46A e o ponto de potência máxima ( $P_{mp}$ ) de 2,1 W com rendimento de 7,9%.

Figura 10 – Experimento para medir a rotação do motor. (1) Painel Fotovoltaico, (2) Conexão painel-motor, (3) Tacômetro Digital



Fonte: Elaborado pelos autores.

Considerando o município de estudo, Cerro Largo, Rio Grande do Sul (latitude  $-28^{\circ}9'2''$  e longitude  $54^{\circ}44'19''$ ) determinou-se os ângulos ideais de instalação para cada estação do ano na região, conforme apresentado na tabela 1. Através do software RadiSol 2 foi possível verificar que posicionar o painel perpendicular à incidência dos raios solares, aumenta consideravelmente o processo de conversão de energia.

Tabela 1 - Inclinação ideal do Painel Fotovoltaico para Cerro Largo-RS

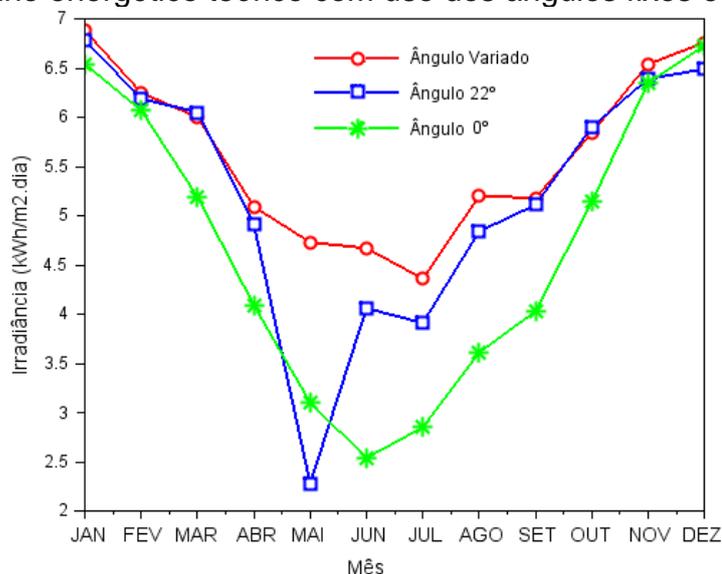
Estação	Período	Ângulo ( $\beta$ )
Verão	21 de dezembro a 20 de março	16°
Outono	20 de março a 21 de junho	44°
Inverno	21 de junho a 23 de setembro	41°
Primavera	23 de setembro a 21 de dezembro	12°

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Analisou-se de forma teórica a eficiência do uso desta variação trimestral do ângulo de instalação frente ao uso de dois ângulos fixos distintos:  $0^{\circ}$  e  $22^{\circ}$ , representados pelas linhas verde e azul. A linha em vermelho foi obtida variando-se o ângulo conforme o ângulo ideal para cada período, ou seja, foram utilizados os

ângulos de 16° nos meses de janeiro, fevereiro e março, 44° nos meses de abril, maio e junho, 41° nos meses de julho, agosto e setembro e 12° nos meses de outubro, novembro e dezembro. Esta análise foi baseada nos valores de irradiação em kWh/m<sup>2</sup>dia que atinge a superfície do painel, conforme Figura 11.

Figura 11. Ganho energético teórico com uso dos ângulos fixos e ângulo variado.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Pode-se observar que o ângulo de 44° frente ao de 22° favorece a conversão de energia nos meses referentes ao equinócio de outono (período de 20 de março a 21 de junho), considerado o pior período do ano, com ganhos energéticos de até 4% no mês de abril, 53% no mês de maio e 13% para o mês de junho.

No solstício de inverno (período de 21 de junho a 23 de setembro) o uso do ângulo de 41° frente ao ângulo de 22° mostra ganhos em até 10%. Nos meses referentes ao equinócio de primavera (período de 23 de setembro a 21 de dezembro) o ângulo de 12° demonstrou um ganho de até 4% e para os meses referentes ao solstício de verão (período de 21 de dezembro a 20 de março) ao se comparar o ângulo de 16° frente ao de 22°, observa-se ganhos energéticos significativos.

Considerando o período de um ano a inclinação variável pode otimizar em até 7,3% a geração de energia quando comparada ao uso do ângulo fixo de 22° e até 20% frente ao ângulo de 0°.

Na verificação da otimização atingida com o uso do ângulo ideal frente aos demais foi possível observar que o ângulo de 44° (ideal para o período estudado) conferiu ao modelo as maiores velocidades, assim como a maior velocidade média do experimento, conforme pode ser verificar no quadro 1. A figura 12 mostra a variação

da velocidade linear em relação às horas do dia experimentadas respectiva a cada ângulo e como se pode observar o ângulo ideal conferiu ao modelo a maior velocidade ao longo de todo o experimento.

Analisando a figura 12, pode-se observar que as velocidades mais altas concentraram-se principalmente nas horas iniciais e finais do experimento, isto se deve ao fato que quanto mais próximo ao horário das 12 horas, momento em que o sol está a pino, passando exatamente por cima de nossas cabeças, o ângulo de instalação do painel passa a perder sua influência sobre o processo de conversão de energia.

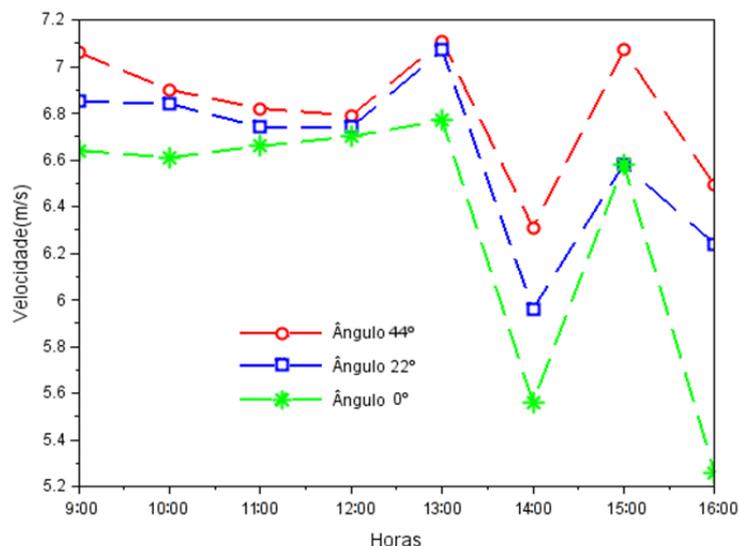
No período inicial das medições, entre 9 e 12 horas também pode se observar uma constância nas velocidades que pode ser explicado segundo TEO et al. (2012), que relata que as células fotovoltaicas, quando aquecidas perdem eficiência. Ressalta-se que os picos de velocidades observados neste experimento têm relação com a presença de nuvens nos momentos das medições, que gerou uma variação da irradiância solar ao longo do dia.

Quadro 1 – Velocidades atingidas no modelo.

Velocidade	Ângulo	Hora								Média
		09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	
Rotacional (rpm)	0°	2045	2036	2052	2064	2085	1713	2027	1620	1955
	22°	2110	2107	2076	2076	2178	1836	2027	1922	2042
	44°	2175	2125	2101	2092	2190	1944	2178	1999	2100
Angular (rad/s)	0°	214,2	213,2	214,8	216,1	218,4	179,4	212,3	169,7	204,8
	22°	221,0	220,6	217,4	217,4	228,1	192,3	212,3	201,3	213,8
	44°	227,7	222,6	220,0	219,0	229,4	203,5	228,1	209,4	220,0
Linear (m/s)	0°	6,6	6,6	6,7	6,7	6,8	5,6	6,6	5,3	6,3
	22°	6,9	6,8	6,7	6,7	7,1	6,0	6,6	6,2	6,6
	44°	7,1	6,9	6,8	6,8	7,1	6,3	7,1	6,5	6,8

Fonte: Elaborado pelos Autores.

Figura 12 - Perfil de velocidade linear obtida no modelo



Fonte: Elaborado pelos Autores.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos no modelo demonstram que o uso do ângulo ideal é capaz de otimizar o processo de conversão de energia dentro dos painéis fotovoltaicos visto que o uso deste conferiu uma maior velocidade ao modelo. Desta forma se fosse possível aliar a este ângulo fixado um sistema de variação do desvio azimutal, o qual muda constantemente devido ao movimento da terra, se obteria ainda um melhor aproveitamento da placa.

Para trabalhos futuros cogita-se o desenvolvimento de um sistema de rastreamento solar azimutal que seja capaz de manter o PV sempre perpendicular à incidência dos raios solares. A proposta seria fixar os ângulos ideais de instalação determinados via Radiasol em cada período do ano e com o sistema de rastreamento solar acompanhar o movimento do nascer e por do sol potencializando a incidência de luminosidade sobre o PV. Contudo vale-se ressaltar que dispositivos rastreadores necessitam consumir parte da energia captada para seu funcionamento, devido ao fato de utilizarem sistemas eletrônicos em conjunto com motores elétricos para alterar a posição dos módulos solares, tal que, antes de se implementar estes dispositivos deve-se analisar primeiramente a viabilidade destes de acordo com a aplicação desejada.

## REFERÊNCIAS

ABSOLAR (Brasil) (org.). **INFOGRÁFICO ABSOLAR**. 2020. Disponível em: <[solar.org.br/infografico-absolar-.html](http://solar.org.br/infografico-absolar-.html)>. Acesso em 08 de maio de 2020.

ABBOTT, D. Keeping the energy debate clean: how do we supply the world's energy needs?. **Proceedings of the IEEE**, Vol. 98, nº1, 2010.

BEAUME, R.; MIDLER, C. From technology competition to reinventing individual ecomobility: new design strategies for electric vehicles. **International Journal of Automotive Technology and Management**, Vol. 9, nº 2, pág 174-190, 2009.

BIONE, J.; VILELA, O. C.; FRAIDENRAICH, N. Comparison of the performance of PV water pumping systems driven by fixed, tracking and V-trough generators. **Solar Energy**, Vol. 76, pág. 703-711, 2004.

BITTENCOURT, F. T.; MOTA, L. S.; SANTANA, P. L.; COSTA, M. M.; SOUZA, J. C. Construção de um protótipo de rastreador solar para aplicação em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. **Revista Sítio Novo, Tocantins**, Vol. 1, pág 147-157, 2017.

CRESEB (CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014.



CHOWDHURY, N.; HOSSAIN, C. A.; LONGO, M.; YAICI, W. Optimization of Solar Energy System for the Electric Vehicle at University Campus in Dhaka, Bangladesh. **Energies, MDPI**, Vol. 11, pág 1-10, 2019.

DECHERF, O.; GOYBET, A.; SAFFER, M.; PASCAL, V. Inventário das emissões de gases de efeito estufa no Rio Grande do Sul – 2005. PACE: uma estratégia territorial integrada. Porto Alegre: **FEPAM; Enviroconsult; Engebio**, 2011.

GUANIEIRO, L.L.N.; VASCONCELLOS, P.C.; SOLCI, M.C. Poluentes Atmosféricos Provenientes da Queima de Combustíveis Fósseis e Biocombustíveis: Uma Breve Revisão. **Revista Virtual de Química**, Vol.3, nº5, pág 434-445, 2011.

HAAG, R.; SOARES, S. R.; TOMASZEWSKI, A. G.; BRAZIL, C.; GASPARIN, P. F.; SILVA, B. A. Atlas Solar do Rio Grande do Sul. **UERGS**, Porto Alegre, 2018. E-book no formato PDF. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/328942926\\_ATLAS\\_SOLAR\\_DO\\_RIO\\_GRANDE\\_DO\\_SUL](https://www.researchgate.net/publication/328942926_ATLAS_SOLAR_DO_RIO_GRANDE_DO_SUL)> Acesso em 25 de outubro de 2019.

INPE (Brasil) (ed.). **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2017. INPE. Disponível em: <<http://.inpe.br/informativo/08/nota03>>. Acesso em 06 de agosto de 2020.

NETO, M. M.; ZANETTI, W; PIAZENTIN, J. C. Ensaio Para Obtenção Das Características Elétricas De Uma Célula Fotovoltaica Para Aplicação Em Um

Rastreador Solar. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, Vol.14, 2017.

PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. Manual De Engenharia Para Sistemas FotovoltaicoS. **CEPEL-DTE-CRESESB**, Rio de janeiro, 2014. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/manual\\_de\\_engenharia\\_fv\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/manual_de_engenharia_fv_2014.pdf)>. Acesso em 10 de março de 2019.

PISANTI, C. Design and energetic evaluation of a mobile photovoltaic roof for cars. **Energy Procedia**, nº 8, pág 182-192, 2015.

REZENDE, J. O.; GUIMARÃES JÚNIOR, S. C. Determinação De Processos Para Levantamento Prático Das Curvas Características De Painéis Fotovoltaicos. In: Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2012. **Anais eletrônicos** Disponível em: <[http://www.ceel.eletrica.ufu.br/artigos2012/ceel2012\\_artigo010\\_r01.pdf](http://www.ceel.eletrica.ufu.br/artigos2012/ceel2012_artigo010_r01.pdf)> Acesso em: 24 de outubro de 2018.

SOFTWARE RADIASOL 2 – UFRGS. Disponível em: <<http://www.solar.ufrgs.br/>> Acesso em: 29 de maio de 2019.

SWART, J. W. Conceitos Básicos Para Semicondutores. **UNICAMP**. Campinas, 2011. Disponível em: <[www.ccs.unicamp.br/cursos/fee107/download/cap02.pdf](http://www.ccs.unicamp.br/cursos/fee107/download/cap02.pdf)> Acesso em 15 de março de 2019.

TEO, H.G.; LEE,P.S.; HAWLADER, M.N.A. An active cooling system photovoltaic modules. **Applied Energy**, Vol. 90, pág 309-315, 2012.

