



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL**  
**CAMPUS CERRO LARGO**  
**CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**THAÍS CORDEIRO PRATES**

**VEÍCULO ELÉTRICO MOVIDO A ENERGIA FOTOVOLTAICA COM SISTEMA  
DE RASTREAMENTO SOLAR**

**CERRO LARGO-RS**

**2019**

**THAÍS CORDEIRO PRATES**

**VEÍCULO ELÉTRICO MOVIDO A ENERGIA FOTOVOLTAICA COM SISTEMA  
DE RASTREAMENTO SOLAR**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção de  
grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e  
Sanitária da Universidade Federal da Fronteira  
Sul – *Campus* Cerro Largo (RS).

Orientador: Prof.º Dr. Jorge Luis Palacios  
Felix

**CERRO LARGO - RS**

**2019**

## **Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS**

Prates, Thais Cordeiro

Veículo Elétrico movido a Energia Fotovoltaica com Sistema de Rastreamento Solar / Thais Cordeiro Prates.

-- 2019.

73 f.

Orientador: Pós-doutor em Matemática Aplicada Jorge Luis Palacios Felix.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Cerro Largo, RS , 2019.

1. Energias Renováveis. 2. Energia solar fotovoltaica. 3. Rastreador Solar. 4. Veículo elétrico. 5. Arduino. I. Felix, Jorge Luis Palacios, orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

**THAÍS CORDEIRO PRATES**

**VEÍCULO ELÉTRICO MOVIDO A ENERGIA FOTOVOLTAICA COM SISTEMA  
DE RASTREAMENTO SOLAR**

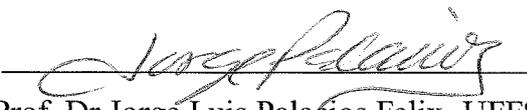
Trabalho de Conclusão de Curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção de  
grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e  
Sanitária da Universidade Federal da Fronteira  
Sul – *Campus* Cerro Largo (RS).

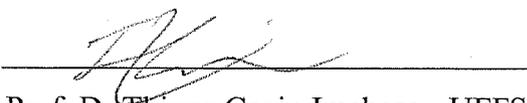
Orientador: Prof.º Dr. Jorge Luis Palacios  
Felix

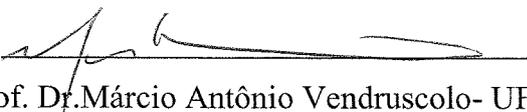
Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em:

06 / 12 / 2019

BANCA EXAMINADORA

  
Prof. Dr. Jorge Luis Palacios Felix - UFFS  
(Orientador/Banca examinadora)

  
Prof. Dr. Thiago Cacio Luchese - UFFS  
(Banca examinadora)

  
Prof. Dr. Márcio Antônio Vendruscolo - UFFS  
(Banca examinadora)

**CERRO LARGO - RS**

**2019**

Dedico este trabalho à minha família, amigas e amigos que sempre estiveram comigo me incentivando e apoiando, dando-me coragem para enfrentar os desafios, em busca da concretização dos meus objetivos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais Renaldo e Luciene por todo esforço que fizeram durante esses cinco anos para me manter na Universidade, a minha irmã Bruna e a minha avó Francisca pelo apoio incansável.

Agradeço à minha amiga Andreza por sempre ter me motivado a não desistir e ser cada dia melhor.

Agradeço também aos demais familiares e as minhas amigas Brena e Marina, que hoje são como minha família aqui em Cerro Largo.

Agradeço à Aline, Lorena e Djaina que nos momentos mais difíceis estavam sempre ao meu lado.

Agradeço à Leticia, Melissa e Nicolas pela amizade mais sincera que foi construída ao longo destes anos.

Agradeço à Camila e Thaina por sempre me incentivarem e acreditarem na minha capacidade de superação.

Agradeço à Cristiano e aos técnicos do laboratório por toda ajuda durante a experimentação do presente estudo.

Agradeço à Instituição, principalmente aos professores Marcio Pinheiro e Tiago Ricci por sempre incentivarem meu crescimento acadêmico e pessoal.

Ao meu orientador Jorge Luis Palacios Felix que neste último ano de graduação dedicou seu tempo para me orientar e incentivar a buscar o melhor de mim.

Aos colegas de curso, com os quais tive o privilégio de conviver, foi um grande aprendizado a convivência com todos vocês.

A todos aqueles que colaboraram de alguma forma para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Há uma crescente conscientização sobre a necessidade de se alcançar uma mobilidade mais sustentável. Nos últimos anos estão sendo feitos sucessivos esforços para aumentar a aplicação da energia solar fotovoltaica em carros elétricos e híbridos. Entretanto essa possibilidade de aplicação é questionável uma vez que a eficiência dos painéis fotovoltaicos é baixa comparada a outros meios de energia. No presente trabalho desenvolveu-se um modelo de veículo elétrico movido a energia fotovoltaica com dispositivo de rastreamento solar. O objetivo deste estudo foi comparar dois sistemas fotovoltaicos alternativos, um fixo, com o painel fotovoltaico (PV) disposto de forma plana, e um móvel equipado com um rastreador solar. Experimentalmente investigou-se o desempenho energético dos sistemas baseando-se na performance elétrica do painel fotovoltaico e na velocidade do veículo, utilizando-se testes de inferência estatísticas e comparações com outros trabalhos da literatura. Os resultados obtidos demonstraram, com 95% de confiança, que utilizar o rastreador solar em dias ensolarados podem aumentar até 16,3% a energia produzida por este. Já em dias nublados não se observou vantagem com o uso deste dispositivo. No modelo, a velocidade média obtida com o uso do rastreador foi de 0,85 m/s, cerca de 30% superior à obtida sem o uso deste dispositivo. Assim, com 95% de confiança, podemos concluir que utilizar esta tecnologia em veículos elétricos pode melhorar significativamente seu desempenho.

**Palavras-chaves:** Energias renováveis. Energia fotovoltaica. Veículo elétrico. Arduino. Rastreamento Solar

## **ABSTRACT**

There is a growing awareness of the need to achieve a more sustainable mobility. In the past years efforts are being made to increase the application of photovoltaic solar energy in electric and hybrid cars. However, this possibility of application is questionable, since the efficiency of photovoltaic panels is low in comparison to other energy sources. In the present model of a photovoltaic electric vehicle solar tracking device was developed. The aim of this study was to compare the two alternative photovoltaic systems, one fixed, with the photovoltaic panel (PV) arranged flat, and one mobile equipped with a solar tracker. Experimentally it was investigated the energetic performance of the system based on the electric performance of the photovoltaic panel and the velocity of the vehicle, using statistical inference tests , comparisons with other works of the literature. The results showed with, 95% confidence, that using the solar tracker on sunny days can increase up to 16,3% of the energy produced by it. Already on cloudy days there was no advantage with the use of this device. In the model, the average speed obtained with the use of the tracker was 0.85 m/s about 30% higher than that obtained without using this device so, with 95% confidence, we can conclude that using this technology on electric vehicles can significantly improve their performance.

Keywords: Renewable Energy. Photovoltaics. Electric vehicle. Arduino. Solar Tracking

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.....	20
Figura 2– Circuito aplicado para a construção da curva característica do painel fotovoltaico.	21
Figura 3 – Curvas características de um Painel Fotovoltaico.....	21
Figura 4 – Ângulos de posicionamento de uma superfície solar.....	22
Figura 5 – Eficiência de trabalhos comparativos entre sistemas fotovoltaicos com rastreadores solares e sistemas fixos relatados pelo mundo.....	27
Figura 6 – Fluxograma de desenvolvimento do projeto.....	33
Figura 7 – Circuito utilizado para a construção da curva característica.....	34
Figura 8 – Painel solar fotovoltaico 5V.....	36
Figura 9 – Design do suporte utilizado na confecção do modelo.....	37
Figura 10 – Micro controlador Arduino UNO R3.....	38
Figura 11 – Resistor dependente de Luz.....	38
Figura 12 – Servo motor Modelo 9g SG90.....	39
Figura 13 – Configuração e Estrutura dos LDR's .....	39
Figura 14 – Esquema de funcionamento do Rastreo.....	40
Figura 15 – Esquema elétrico do Sistema de Controle.....	41
Figura 16 – Resultado final do conjunto suporte-rastreador.....	42
Figura 17 – Modelo final.....	42
Figura 18 – Localização do teste de rastreamento em ambiente externo.....	43
Figura 19 – Configuração do teste de rastreamento.....	44
Figura 20 – Teste de rastreamento em ambiente externo.....	44
Figura 21 – Teste de Performance Elétrica.....	46
Figura 22 – Configuração do Teste no Modelo .....	48

Figura 23 – Instrumentos utilizados no teste do Modelo.....	48
Figura 24 – Metodologia de determinação da distância real percorrida pelo modelo.....	49
Figura 25 – Curva Característica do painel fotovoltaico em condições de Campo.....	52
Figura 26 – Registro fotográfico do teste de rastreamento no laboratório.....	53
Figura 27 – Registro fotográfico do teste de rastreamento em ambiente externo.....	54
Figura 28 – Potência produzida pelo painel em condições de tempo parcialmente nublado (12/11/2019).....	55
Figura 29 – Potência produzida pelo painel em condições de tempo ensolarado (15/11/2019).....	57
Figura 30 – Potência média total produzida nos experimentos .....	58
Figura 31 – Variação da velocidade registrada no modelo para o sistema móvel e fixo no teste realizado de manhã (11/11/2019).....	61
Figura 32 – Variação da velocidade registrada no modelo para o sistema móvel e fixo no teste realizado de tarde (16/11/2019).....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalhos que realizaram comparações entre a potência produzida por sistemas fotovoltaicos com rastreamento solar e sistemas fixos nos últimos dez anos.....	28
Tabela 2 – Modelos de Veículos elétricos movidos à energia solar em trabalhos realizados pelo mundo. ....	30
Tabela 3 – Testes estáticos para amostras com distribuição normal.....	31
Tabela 4 – Dados do multímetro digital MD-6111 para escala de corrente contínua.....	46
Tabela 5 – Dados do multímetro digital ET-1600 para escala de tensão contínua.....	46
Tabela 6 – Velocidades obtidas no teste do modelo para os dias 11/11/2019 e 16/11/2019....	60

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Método de Análise do Valor de P.....	32
Quadro 2 – Dados obtidos no experimento da construção da curva característica.....	51
Quadro 3 – Dados obtidos no teste de performance elétrica realizado no dia parcialmente nublado (12/11/2019).....	54
Quadro 4 – Dados obtidos no teste de performance elétrica realizado no dia ensolarado (15/11/2019).....	56

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	18
2.1 COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS E ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	18
2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	19
<b>2.2.1 Curva Característica</b> .....	19
<b>2.2.2 Eficiência dos Painéis Solares Fotovoltaicos</b> .....	22
2.3 VEÍCULOS ELÉTRICOS .....	23
<b>2.3.1 Veículos Elétricos movidos a Energia Solar</b> .....	24
2.4 RASTREAMENTO SOLAR .....	25
<b>2.4.1 Tipos de rastreamento solar</b> .....	26
<b>2.4.2 Desempenho de Rastreadores solares</b> .....	27
<b>2.4.3 Veículos elétricos movidos a energia solar com sistema de rastreamento</b> ...	29
2.5 ANÁLISE ESTÁTISTICA .....	30
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	33
3.1. CARACTERIZAÇÃO DO PAINEL FOTOVOLTAICO .....	33
3.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO E SUPORTE ORIENTÁVEL.....	35
<b>3.2.1. Desenvolvimento e Construção do Dispositivo de Rastreamento</b> .....	37
3.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO PARA TESTE DO RASTREADOR .....	42
<b>3.3.1 Teste de Rastreamento Móvel no Laboratório</b> .....	43
<b>3.3.2 Teste de Rastreamento Móvel em Ambiente Externo</b> .....	44
<b>3.3.3 Teste de Performance Elétrica</b> .....	45
3.4 PROCEDIMENTO DE ENSAIO PARA TESTE NO MODELO.....	47
3.5 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS .....	50
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	51
4.1 CURVA CARACTERÍSTICA .....	51
4.2 RESPOSTA DO SISTEMA DE RASTREAMENTO .....	53
<b>4.2.1 Teste de Performance Elétrica</b> .....	54
<b>4.2.2 Teste do Modelo</b> .....	59
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	63
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	65

APÊNDICE A –Programação No Software R - Significância Do Teste De Performance Elétrica.....	70
APÊNDICE B–Programação No Software R - Significância Do Teste Do Modelo .....	71
ANEXO A – Programação do rastreador solar/Arduino .....	72

## 1. INTRODUÇÃO

Os meios de transporte tem um papel fundamental na sociedade, pois se destinam às pessoas, animais, mercadorias, alimentos e entre outros, constituindo-se como uma peça fundamental para o desenvolvimento global. 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 que originam riscos à saúde humana e ao meio ambiente (GUARIEIRO et al., 2011).

A sociedade caminha cada vez mais para um futuro onde o uso de itens para redução da poluição em veículos não será mais opcional, mas sim obrigatório, à medida que se busca cada vez mais a preservação do meio ambiente e a melhoria na qualidade de vida da população (PISANTI, 2015). De acordo com o DECHERF (2011), no estado do Rio Grande do Sul, foram consumidos 9 milhões de TEP (tonelada equivalente petróleo, ou seja 11.600 kWh) no ano de 2005, onde cerca de 40% deste consumo foi destinado ao setor de transportes. Considerando a elevada demanda de combustíveis deste setor observa-se a necessidade da integração de sistemas baseados em energias limpas, que possam suprir a demanda energética destes meios de transporte, como o uso da energia solar em veículos elétricos (CHOWDHURY, 2019).

Os veículos elétricos são definidos como veículos automotores que utilizam pelo menos um motor elétrico no acionamento das rodas. Possuem elevada eficiência energética e baixo ou nulo nível de emissão de poluentes. A maioria dos modelos utilizam baterias para armazenar energia, as quais acabam encarecendo o veículo. Assim a inserção destes no mercado nacional ainda é algo distante da realidade brasileira, devido ao fraco desempenho das máquinas elétricas quando comparadas aos motores a combustão e os altos custos para seu desenvolvimento. Contudo, vale ressaltar que nos últimos anos houve grandes avanços nas tecnologias automotivas e nas baterias, de modo que os carros elétricos de alto desempenho podem em breve tornar-se uma opção para compradores em todo o mundo (BEUME; 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. Deste modo, o

interesse em estudar fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis torna-se pertinente.

Neste trabalho o enfoque vai estar na Energia solar. Este tipo de energia é limpa e praticamente inesgotável, que pode ser aproveitada através de várias tecnologias, desde a tecnologia solar térmica para aquecimento de água até a tecnologia solar fotovoltaica capaz de produzir energia elétrica. A tecnologia solar fotovoltaica é o alvo de estudo deste trabalho.

Considerando que a energia solar incidente no planeta equivale a 166.000 TW, dos quais 30% são refletidos e retornam ao espaço, 19% é absorvido pelas nuvens e o restante incide sobre a superfície terrestre, restam cerca de 85.000 TW disponíveis para ser utilizado, valor este superior a qualquer outra fonte de energia renovável no mundo (ABBOTT, 2010). 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 esta superior a de países como a Alemanha, que exploram muito o potencial solar na sua matriz energética. Deste modo, para suprir a demanda energética dos veículos elétricos propõe-se o uso da energia solar fotovoltaica.

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 à influência do ângulo de instalação dos painéis fotovoltaicos no processo de conversão de energia (BIONE et al., 2004).

A geração de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos acontece através de células fotovoltaicas compostas por materiais semicondutores, que na presença de calor sofrem um aumento de condutividade possibilitando a saída de elétrons do sistema. A superfície destes painéis recebe diferentes intensidades de radiação conforme o ângulo que está instalado, a hora do dia e a época do ano, fato que influencia diretamente no processo de conversão da energia. Deste modo, na instalação dos painéis fotovoltaicos deve-se utilizar sempre um ângulo e um desvio azimutal que proporcione a máxima incidência solar sobre eles (SWART, 2011).

No presente estudo desenvolveu-se um modelo de carro elétrico alimentado por um painel fotovoltaico (PV) inteligente, dotado de um sistema de rastreamento solar. Este sistema é composto por um micro controlador digital (Arduino), sensores de luminosidade e servomotores. O objetivo geral da pesquisa foi apresentar uma proposta para melhoria do desempenho energético dos PV's visando aumentar o uso desta tecnologia em veículos elétricos, tendo ainda como objetivo específico comparar dois sistemas fotovoltaicos alternativos. Um é fixo, com o PV disposto de forma plana, enquanto o segundo é um sistema fotovoltaico equipado com um rastreador solar. Experimentalmente investigou-se se o

desempenho energético do sistema fotovoltaico é melhorado significativamente com o uso do dispositivo de rastreamento solar baseando-se na performance elétrica do PV e na velocidade do veículo, utilizando-se testes de inferência estatística. Ainda buscou-se realizar uma análise comparativa entre os resultados obtidos no estudo e na literatura encontrada.

## 2. 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 cinco seções distintas. A primeira seção aborda a problemática envolvendo o uso de combustíveis fósseis e apresenta como substituição 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, o comportamento dos painéis fotovoltaicos e suas respectivas curvas características. A terceira seção descreve alguns tipos de veículos elétricos, assim como alguns modelos movidos a energia solar. Na quarta seção são apresentados os dispositivos de rastreamento solar, que são peças essenciais para a otimização do processo de geração de energia, além de se apresentar veículos solares dotados de dispositivos de rastreamento que já foram desenvolvidos em outras pesquisas. Por fim, a última sessão aborda os testes e análises estatísticas que foram utilizadas no tratamento dos dados experimentais buscando verificar o nível de significância dos resultados obtidos.

### 2.1 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). A maior parte da demanda mundial desse combustível é destinada à produção de combustíveis e o fato deste ser um recurso não renovável aliado ao crescente aumento da demanda mundial de energia elétrica, têm incentivado as nações a buscarem fontes renováveis para a geração energética, visto a necessidade de se diminuir a dependência de combustíveis fósseis (RICHARDSON, 2013).

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, podendo ser gerada por diversas fontes de recursos naturais que são naturalmente reabastecidos como o sol, vento, chuva, entre outros. 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).

## 2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é gerada através da conversão direta da radiação solar em eletricidade, fazendo uso de um dispositivo conhecido como célula fotovoltaica. Esta célula é responsável por criar o efeito fotoelétrico ou fotovoltaico, que é gerado através da absorção da radiação solar ocasionando uma diferença de potencial na estrutura do material semicondutor contido na célula. Na natureza existem diversos materiais semicondutores e estes consistem em estruturas sólidas que possuem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução totalmente vazia (SWART, 2011).

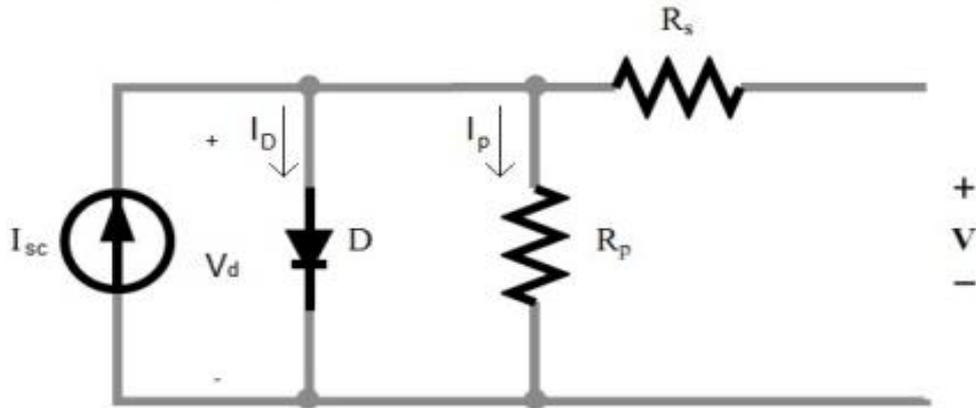
Os materiais semicondutores apresentam um aumento da sua condutividade com a temperatura, de forma que, na presença de calor, ocorre a excitação térmica dos portadores de carga desde a banda de valência para a banda de condução. Esta característica dos semicondutores possibilita que fótons na faixa do 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 e gerar assim uma corrente. A função das células fotovoltaicas é manter o fluxo de elétrons no circuito elétrico conforme a incidência solar (SWART, 2011).

### 2.2.1 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 (NETO et al., 2017).

O circuito equivalente de uma célula fotovoltaica é apresentado na figura 1 e permite obter determinadas equações que, com a análise de gráficos, possibilita a obtenção de parâmetros elétricos da placa (NETO et al., 2017). 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 (Equação 1).

Figura 1– Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.



Fonte: CORTEZ, 2013.

A Equação 1 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).

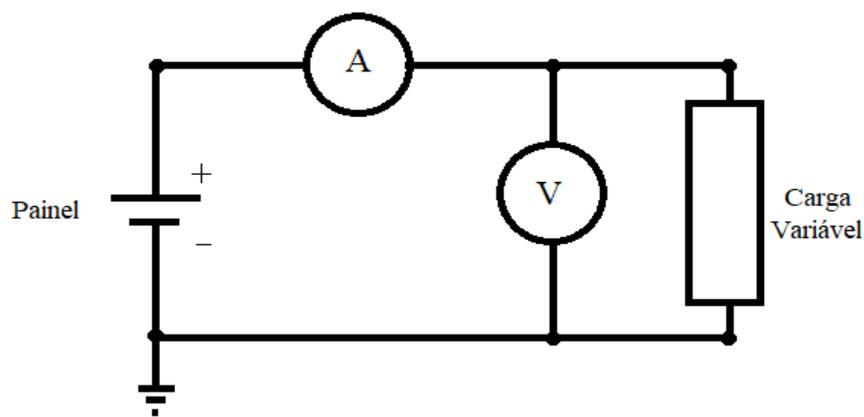
$$I = I_D - I_0 \left[ \exp \left( qV + \frac{IR_s}{nkT} \right) - 1 \right] - \left[ \frac{V + IR_s}{R_p} \right] \quad (1)$$

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 curvas 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 naquelas condições, possibilitando dimensionar e projetar corretamente sua aplicação em outras condições, 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 2.

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; esta tensão equivale à máxima tensão que

a célula pode produzir. A corrente de curto circuito por sua vez representa a máxima corrente que se pode obter na célula quando não existe resistência imposta a esta. A potência elétrica corresponde ao produto da tensão e corrente gerada pelo módulo conectada a uma carga. O fator de forma é a razão entre a máxima potência gerada pela célula e o produto da corrente de curto circuito com a tensão de circuito aberto, esta grandeza expressa o quanto a curva característica se aproxima de um retângulo. Quanto melhor a qualidade das células no módulo, mais próxima da forma retangular será a curva (NETO et. al., 2017).

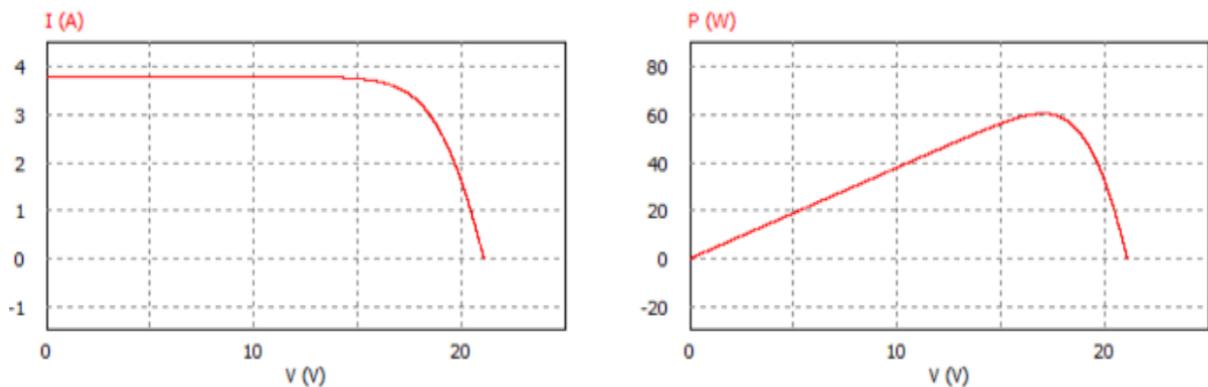
Figura 2 – Circuito aplicado para a construção da curva característica do painel fotovoltaico.



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 3 podemos 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 3 – Curvas características de um Painel Fotovoltaico



Fonte: CORTEZ, 2013.

Nota: Curvas para um Painel Fotovoltaica de 230 Wp, para radiação de 1000 W/m<sup>2</sup> e temperatura de 25°C.

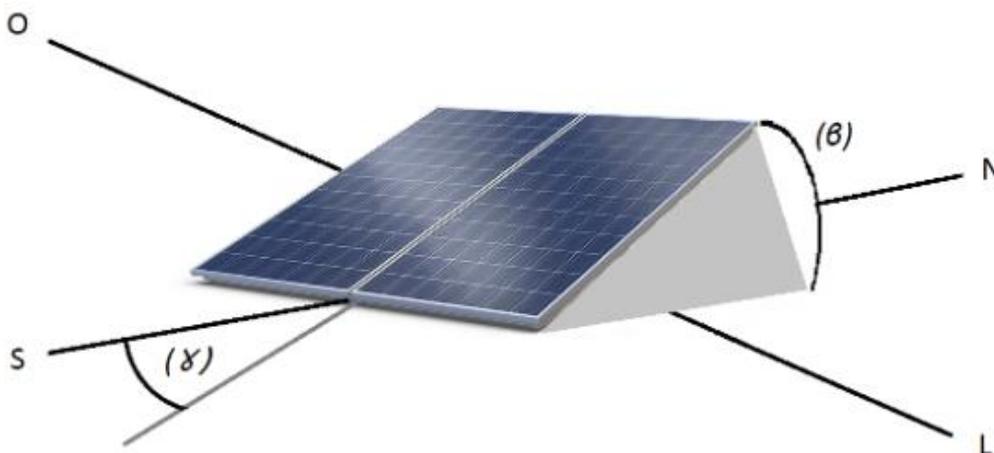
### 2.2.2 Eficiência dos Painéis Solares Fotovoltaicos

A eficiência dos painéis fotovoltaicos depende de diversos aspectos dentre os quais estão a qualidade das células fotovoltaicas, o sombreamento nas células e a capacidade de rastreamento do sol como forma de otimizar a captação solar. Considerando os movimentos de translação e rotação da Terra é possível concluir que a superfície recebe radiação solar com ângulos de incidência diferentes, de acordo com 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).

A intensidade de radiação solar que incide sobre as células fotovoltaicas influencia diretamente no processo de conversão da energia luminosa em energia elétrica, de modo que na instalação dos painéis fotovoltaicos deve-se utilizar um ângulo e desvio azimutal que proporcionem a maximização da incidência solar sobre eles. Assim 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 para este estudo são o ângulo azimutal, ou desvio azimutal ( $\gamma$ ), e o ângulo da superfície de captação ( $\beta$ ), conforme ilustrado na figura 4. 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 4 – Ângulos de posicionamento de uma superfície solar.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

Considerando que os painéis fotovoltaicos têm pouca eficiência na transformação de energia solar em elétrica, deve-se buscar alternativas para otimizar este processo. Assim, o modo de instalar o painel fotovoltaico pode favorecer o processo de captação solar, de forma que o ângulo entre a incidência dos raios solares e a superfície da placa fotovoltaica seja o mais próximo de 90°, que é o ângulo necessário para o maior aproveitamento na captação desta energia. Para aumentar o processo de conversão de energia dentro dos painéis fotovoltaicos pode-se utilizar um sistema eletrônico de rastreamento solar que realize o ajuste automático do painel em função do movimento de rotação da Terra (BITTENCOURT et al., 2017).

### 2.3 VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os veículos elétricos foram desenvolvidos antes mesmo dos veículos com motor à combustão. Estes tipos de veículos apresentam diversas vantagens frente aos convencionais, pois além de serem mais simples de operar ainda possuem um motor silencioso e com emissão nula de poluentes. Contudo, a disseminação destes tipos de veículos foi freada pelo desenvolvimento primitivo das baterias aliado a alta disponibilidade e baixo custo dos derivados de petróleo que desencadeou a produção em massa dos automóveis com motor a combustão no início do século vinte (BEUME; MIDLER, 2009).

Os veículos elétricos podem ser classificados de acordo com a fonte de energia elétrica que o abastece ou com o arranjo dos componentes do sistema de tração elétrica que possui. As principais categorias de veículos elétricos são os veículos elétricos a bateria, veículos elétricos híbridos, veículos elétricos de célula a combustível e veículos solares (KAGAN et al., 2013). A força de propulsão destes veículos se dá por meio de um ou mais motores elétricos. Estes motores são dispositivos capazes de transformar energia elétrica em cinética, por meio de uma corrente elétrica que pode ser contínua ou alternada. Essa energia promove a rotação de um eixo que é transmitida às rodas que, por fim, são responsáveis por fazer a movimentação do veículo. É possível realizar o controle da velocidade de rotação deste eixo em qualquer sentido, promovendo movimentos nos sentidos horário e anti-horário, produzindo deslocamento para frente e para trás com velocidade controlada (BARACHO, 2016).

O modelo mais comum destes veículos são os que utilizam bateria. Estes modelos além de possuir bateria e motor elétrico, possuem ainda um controlador responsável por regular a quantidade de energia fornecida pelo uso do acelerador do motorista. A energia utilizada pelos sistemas auxiliares do veículo e pelo motor procede da energia química

armazenada em baterias instaladas no próprio veículo, onde a recarga das baterias pode ser feita por meio da rede elétrica convencional ou por aproveitamento de energias alternativas como solar e eólica (BARACHO, 2016).

De acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) o número de veículos elétricos licenciados no país aumentou em 20%, de 3.296 unidades em 2017 para 3.970 unidades em 2018. Contudo a tecnologia das baterias ainda é considerada umas das principais barreiras para fazer este tipo de veículo ser competitivo no mercado com relação aos veículos com motores a combustão. Ainda vale ressaltar que estas baterias possuem vida útil de aproximadamente dez anos e, após o uso, se constituem como um resíduo perigoso e de difícil disposição final (BARACHO, 2016).

### **2.3.1 Veículos Elétricos movidos a Energia Solar**

Nos últimos anos, com a expansão do uso da energia fotovoltaica e dos veículos elétricos, surgiram muitas propostas de sistemas fotovoltaicos voltados para efetuar as recargas destes veículos e, diante disto surgiu o questionamento de que se utilizamos essa fonte limpa para recarregar os veículos elétricos, seria possível utilizar a mesma como fonte de alimentação direta do veículo.

Veículos movidos à energia solar eram até certo tempo atrás algo distante da realidade mundial. Porém, projetos de carros movidos a energia alternativa, como a solar, estão sendo constantemente estudados e apresentados como possíveis alternativas aos modelos convencionais com motores a combustão. Com os avanços tecnológicos da energia solar fotovoltaica os carros movidos por esta fonte despontaram como uma solução já viável aos dias de hoje (FONTES, 2019).

Ainda que sejam poucos os modelos de veículos que utilizam a energia fotovoltaica como fonte de alimentação, atualmente é possível desenvolver estes veículos movidos integralmente por esta fonte de energia através do uso de diferentes tecnologias. O primeiro veículo solar foi criado em 1955 pelo americano William G. Cobb, funcionário da General Motors. O projeto de veículo foi apresentado na feira “Powerama” organizada pela própria montadora, realizada na cidade americana de Chicago. O modelo denominado “Sunmobile”, possuía apenas 38 centímetros de comprimento e se assemelhava a um carrinho de brinquedo, continha 6 placas fotovoltaicas de Selênio que alimentavam um pequeno motor elétrico ligado ao eixo de transmissão do veículo.

Em 1958 foi desenvolvido o primeiro veículo solar dirigível pela empresa International Rectifier Company, que converteu um modelo de 1912 do carro elétrico “Baker” para funcionar com energia fotovoltaica. O veículo possuía aproximadamente 10.640 células fotovoltaicas dispostas sobre o telhado do automóvel para alimentar a sua tração (FONTES, 2019).

GIANNOULI & YIANOULIS (2012) determinaram o potencial de geração de energia elétrica de um painel fotovoltaico instalado de forma horizontal sobre um veículo elétrico híbrido na Grécia. Neste estudo para o painel solar utilizado verificou-se uma potência gerada capaz de economizar cerca de 100 litros de gasolina por ano. PISANTI (2015) realizou uma comparação entre um sistema fotovoltaico móvel com funções de rastreamento solar azimutal para veículos elétricos híbridos, buscando analisar a energia máxima produzida mensalmente pelos sistemas para uma cidade localizada no Sul da Itália. O resultado deste estudo demonstrou que a captação da radiação solar nestes modelos é de 30 a 47% superior quando comparado com o sistema fixo. Em termos de poluição atmosférica, ainda podemos destacar um estudo realizado recentemente na União Europeia, onde se verificou que o uso de painéis fotovoltaicos integrado a veículos elétricos pode, em condições reais, reduzir de 1,5 a 3,5 g de CO<sub>2</sub>/km percorridos (LODI et al., 2018).

Na próxima seção, no tópico Veículos elétricos movidos à energia solar com sistema de rastreamento, são apresentados na Tabela 2 outros trabalhos desenvolvidos tratando de veículos elétricos movidos à energia solar evidenciando o local onde cada um desses estudos foi realizado, o tipo de painel fotovoltaico e motor elétrico utilizado e desempenho energético deste em termos de velocidade.

## 2.4 RASTREAMENTO SOLAR

Os rastreadores solares são dispositivos eletrônicos que tem por objetivo aumentar a captação da radiação solar nas células fotovoltaicas, buscando manter o painel sempre perpendicular à radiação solar incidente. Este sistema de rastreio proporciona que os painéis fotovoltaicos fiquem sempre na posição mais favorável à captação solar de forma a otimizar o processo de conversão de energia. Teoricamente, segundo MOUSAZADEH (2009) o uso deste dispositivo pode aumentar até 57% do processo de conversão de energia, contudo em condições de campo este valor pode ser um pouco mais baixo.

ABDALLAH & NIJMEH (2004) utilizaram um sistema de rastreamento de dois eixos e experimentaram sua eficiência em uma região à latitude 32°. Em seu experimento

verificaram um aumento de desempenho do módulo fotovoltaico de 41,34% em comparação com a superfície fixa. Ressalta-se que para sistemas fotovoltaicos integrados a veículos, o rastreamento solar pode apresentar desempenhos menores que este devido à oscilação da radiação solar sobre o painel frente à locomoção do veículo.

#### **2.4.1 Tipos de rastreamento solar**

Um rastreador solar é uma tecnologia que comprovadamente pode aumentar a produção de energia nos sistemas fotovoltaicos por ser capaz de direcionar o painel sempre para o sol, desde o amanhecer até o anoitecer. A radiação solar direta coletada pelos módulos fotovoltaicos, quando montada em um sistema de rastreamento, é maior do que o nível de radiação coletada em sistemas fixos. Assim, existem diversos tipos de tecnologias para rastreamento solar com diferentes custos, desempenho e sofisticação. Estes sistemas além de aumentar a geração de energia nos painéis fotovoltaicos possuem baixo custo de manutenção, tendo uma rentabilidade inegável, sobretudo em países como o Brasil que possui grande potencial de aproveitamento solar (GIL et al., 2009).

De acordo com o eixo de rotação podem-se distinguir dois tipos de rastreadores solares, aqueles que possuem eixo único, ou dois eixos (eixo duplo). Os rastreadores de dois eixos são mais eficientes do que os de eixo único por fazer o seguimento através dos dois eixos garantindo níveis maiores de captação. Quanto maior o ângulo de incidência solar, aquele entre a posição do Sol e uma reta perpendicular ao painel, menor será a potência de geração de energia. O rastreador busca reduzir este ângulo a zero a fim de elevar a produção energética ao seu máximo (CORTEZ, 2013).

Para efetuar o rastreio solar estes dispositivos utilizam um ou dois motores, sensores de luminosidade ou calendários, suprimento de energia própria ou externa podendo ter seu funcionamento variado durante o ano inteiro ou em apenas algumas estações do ano. Além disso, estes sistemas ainda podem ser classificados como passivos, quando movidos pela expansão térmica de um líquido (reações químicas), ou ativos, quando movidos por motores, computadores ou manualmente (MOUSAZADEH et al., 2009)

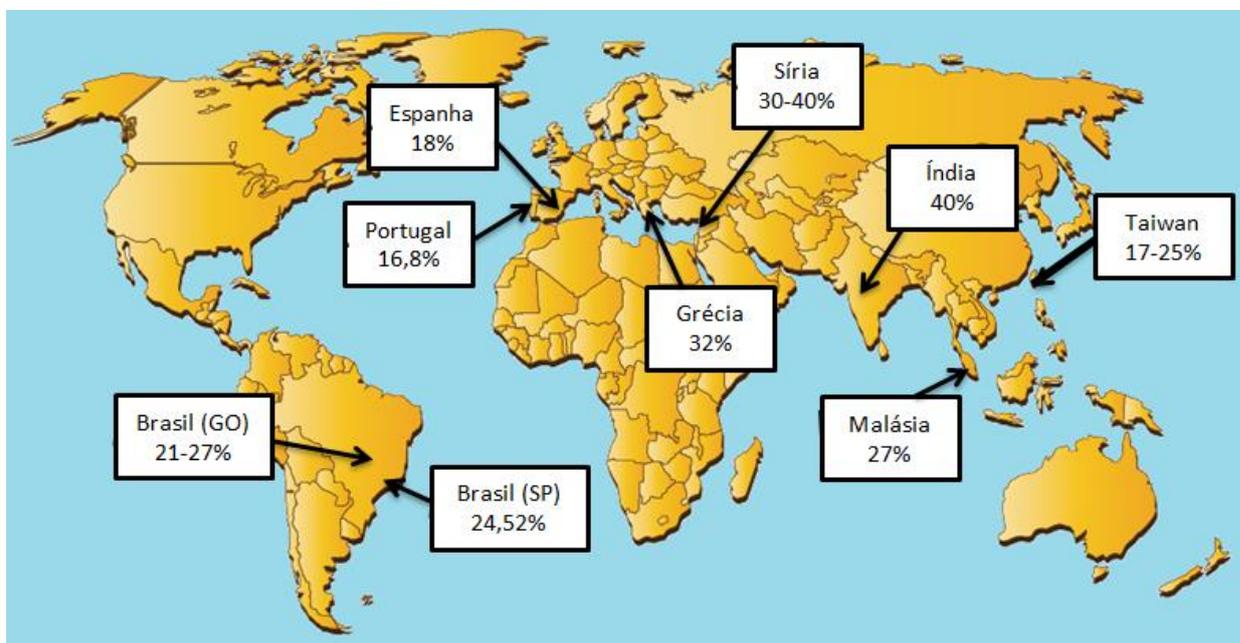
Os rastreadores ativos ainda podem ser divididos entre aqueles que utilizam a diferença de iluminação entre sensores posicionados estrategicamente no painel solar e aqueles baseados em data e tempo, por meio de equações que estimam a posição do sol em determinado período do ano. O primeiro tipo utiliza sensores de luz que, quando em desequilíbrio, ativam processadores que estão conectados ao sistema responsável por efetuar

movimento acionando o motor até que os sensores atinjam uma diferença de iluminação próxima à zero, o que indicará a posição ótima do painel. Este tipo de rastreador é o que possui a maior eficiência, visto que o modelo baseado em data e tempo efetua cálculos que são estimativas da posição solar. Ainda pode-se utilizar uma combinação destes dois tipos de rastreamento (MOUSAZADEH et al., 2009).

#### 2.4.2 Desempenho de Rastreadores solares

A partir de dados da literatura pode-se perceber que vários métodos de rastreamento foram propostos e validados em todo o mundo e cada um deles tem seus prós e contras em termos de eficiência, complexidade e custo. A Figura 5 mostra a eficiência mínima, máxima e média de alguns trabalhos de rastreamento solar sendo relatados experimentalmente no Brasil e em outros países. Maiores detalhes de cada um destes trabalhos estão apresentados na Tabela 1. Ressalta-se que esta seção apresenta trabalhos que trazem resultados a respeito da eficiência de sistemas fotovoltaicos com rastreadores solares em comparação ao uso de sistemas fotovoltaicos fixos em estudos realizados pelo mundo nos últimos 10 anos, identificando a região e a estação do ano em que o estudo foi analisado, assim como a tecnologia de rastreamento utilizada pelos autores.

Figura 5 – Eficiência de trabalhos comparativos entre sistemas fotovoltaicos com rastreadores solares e sistemas fixos relatados pelo mundo.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

Aparentemente, a diferença da eficiência do rastreamento solar varia muito entre os países observados devido as diferentes localizações geográficas, clima e condições locais. Além disso, a eficiência do rastreamento solar na mesma região durante diferentes estações do ano também pode ser significativamente diferente. A eficiência normalmente é alta no verão, enquanto no inverno, outono e primavera tem-se uma eficiência média.

Tabela 1 – Trabalhos que realizaram comparações entre a potência produzida por sistemas fotovoltaicos com rastreamento solar e sistemas fixos nos últimos dez anos.

Autores	Local	Estação	Tecnologia de Rastreamento	Eficiência*
DHANABAL et al., 2013.	Tamil Nadu, Índia	N.E**	LDR	40%
ZHAN et al., 2013.	Kaohsiung, Taiwan	N.E**	CLP***	17-25% (ensolarado) 8-11% (nublado)
SIDEK e al., 2014.	Selangor, Malásia	N.E**	GPS	27% (ensolarado) 19% (nublado)
ASSAF, 2014.	Damasco, Síria	Verão	LDR	30-40%
FATHABADI, 2016.	Athenas, Grécia	Primavera	LDR	32%
MARTINS, 2016.	Lisboa, Portugal	Inverno	LDR	16,8%
MORÓN et al., 2017	Madri, Espanha	Inverno/ Primavera	Fotodiodos	18%
ORTIZ et al., 2018	Goiás, Brasil	Primavera	LDR	21-27%
FREITAS, 2019.	São Paulo, Brasil	Primavera	LDR	24,52%

\*Eficiência relativa à comparação de rastreadores solares de dois eixos e sistemas fixos.

\*\*N.E = Não especificado.

\*\*\*CLP= Controlador lógico programável.

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

### 2.4.3 Veículos elétricos movidos a energia solar com sistema de rastreamento

Considerando a viabilidade de se construir veículos elétricos alimentados diretamente pela energia solar, cogitou-se a possibilidade de aliar a este um sistema de rastreamento solar, visto a potencialidade que estes sistemas possuem de maximizar a produção de energia nas células fotovoltaicas. A integração destes sistemas pode tornar viável o desenvolvimento de um veículo elétrico livre de baterias que possa realizar percursos matutinos e vespertinos utilizando apenas a luz solar como sua força de tração, tornando o modelo ainda mais limpo e sustentável.

Poucos trabalhos foram desenvolvidos acerca desta temática pelo mundo, sendo os asiáticos responsáveis pela maior parte das pesquisas existentes. Em Bangladesh um grupo de pesquisadores desenvolveu um veículo elétrico utilizando um sistema fotovoltaico com rastreamento solar em conjunto com células de combustível de hidrogênio. O painel e as células são responsáveis por carregar a bateria do veículo. O uso destas duas tecnologias proporciona ao veículo uma maior autonomia onde mesmo em situações noturnas ou em dias chuvosos e nublados o veículo é capaz de se locomover pela ação das células combustíveis. A velocidade média atingida por este modelo com o uso do rastreador solar foi de 1,01 m/s (AL-AMIN et al., 2014).

Outra pesquisa deste mesmo segmento ocorreu na Índia, onde uma dupla de pesquisadores foi responsável pela construção de um veículo elétrico controlado via rede de comunicação GSM, podendo ser operado de qualquer local com rede GSM. O veículo é alimentado por um painel fotovoltaico com 5W de potência responsável por recarregar baterias de 12V. Este painel possui um sistema de rastreamento solar com eixo duplo, que realiza a medição dos dados da intensidade da luz como uma referência para o rastreo, tendo a capacidade de manter o painel sempre perpendicular à incidência solar. Como o veículo é controlado via celular, pode-se enviá-lo a longas distâncias sem preocupação com a carga das baterias, uma vez que esta acumula a energia necessária a partir do painel fotovoltaico.

O desempenho de rastreadores solares em veículos elétricos pode ser avaliado relacionando-se as velocidades obtidas com e sem o uso deste dispositivo visto que durante seu uso a eficiência do painel fotovoltaico é maximizada. Durante o levantamento realizado acerca do estado da arte deste trabalho, encontraram-se poucos autores que realizaram estudos com características similares a este. Dentre os trabalhos encontrados, AL-AMIN et al. (2014) foram os únicos a atestar a eficiência do uso de um dispositivo de rastreamento solar aplicado a um veículo elétrico fotovoltaico em escala modelo, contudo, aquele estudo não traz

nenhuma informação acerca do desempenho do modelo de forma anterior ao uso do dispositivo, tornando impossível mensurar a eficiência do uso do rastreador solar nesta aplicação. Visando possibilitar a análise comparativa entre os resultados obtidos no presente estudo a Tabela 2 traz alguns trabalhos desenvolvidos com modelos de veículos elétricos que utilizaram a energia fotovoltaica como fonte de alimentadora, apresentando suas principais características.

Tabela 2- Modelos de Veículos elétricos movidos a energia solar em trabalhos realizados pelo mundo

Autor	Tecnologia	Tensão d PV	Potência do Motor	Peso total do veículo	Velocidade
AL-AMIN et al., 2014.	Rastreamento tipo CLP**	15V	3 W	3,10 kg	1,01 m/s
ASHRAFEE et al., 2014.	Painel fixo (horizontal)	10 W	4,85 W	N.E*	0,31 - 0,41 m/s
SHAZIB UDDIN, 2015.	Painel fixo (horizontal)	8 V	N.E*	2,20 kg	0,52 m/s
VITORIO et al., 2017.	Painel fixo (horizontal)	5 V	N.E*	N.E*	1,27 m/s

\*N.E = Não especificado.

\*\* CLP= Controlador lógico programável.

Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

## 2.5 ANÁLISE ESTÁTISTICA

A estatística é a ciência do planejamento de estudos e experimentos, da obtenção de dados e, em seguida, da organização, resumo, apresentação, análise, interpretação e elaboração de conclusões com base nos dados (TRIOLA, 2014). A partir de dados amostrais e do uso de ferramentas estatísticas é possível tirar conclusões sobre populações, fornecendo uma primeira informação no sentido de apontar a existência ou não de possíveis relações entre variáveis. Neste contexto, o presente estudo utilizou análises de inferência estatística para verificar significância dos resultados experimentais.

O conjunto de dados obtidos em experimentos com painéis fotovoltaicos possui informações de diversas variáveis como potência, tensão e corrente, medidas em diferentes escalas e unidades, visto que essas são dependentes da variação na radiação solar. Deste modo, o emprego da análise estatística foi utilizado para organizar, descrever, analisar e

interpretar esses dados de uma maneira mais confiável buscando confirmar ou não uma hipótese. Os testes de hipóteses são classificados em paramétricos e não paramétricos. Para se definir que tipo de teste estatístico será utilizado é necessário conhecer a característica da amostra. Se esta possuir uma distribuição normal, sua análise deve ser realizada por meio de testes estatísticos paramétricos. Estes testes podem verificar o comportamento de uma amostra, duas amostras independentes, duas amostras emparelhadas (dependentes) e várias amostras. Amostras dependentes são medições pareadas para um conjunto de itens enquanto as amostras independentes são medições feitas em dois conjuntos de itens diferentes. Quando você faz um teste de hipótese usando duas amostras aleatórias, é necessário verificar a dependência, ou não, de suas amostras. Se os valores em uma amostra afetam os valores de outras amostras, então as amostras são dependentes; da mesma forma, se os valores em uma amostra não fornecem informações sobre os valores na outra amostra, então as amostras são independentes (TRIOLA, 2014).

Se a amostra não possuir uma distribuição normal, os testes estatísticos a serem utilizados são os não paramétricos. Esses se baseiam em um modelo que define apenas critérios muito superficiais e não requer nenhum critério acerca da forma específica da distribuição da qual a amostra foi retirada. Para amostras grandes, com número de elementos maior ou igual a 30, a distribuição amostral da média já pode ser considerada normal. Essa normalidade pode ser verificada mediante a construção de um histograma que deve ter comportamento gaussiano. Para amostras pequenas com quantidade de elementos menores que 30, devem ser realizados testes de normalidade. Estes testes verificam se a distribuição de probabilidade associada a um conjunto de dados pode ser aproximada pela distribuição normal. O teste de normalidade mais utilizado é o teste de Shapiro-Wilk, baseado em uma estatística ( $W$ ) calculada sobre os valores amostrais ordenados elevados ao quadrado, buscando aferir se uma amostra aleatória é originária de uma distribuição normal (CIRILLO; FERREIRA, 2003). Os testes possíveis de aplicação em amostras com distribuição normal estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Testes estáticos para amostras com distribuição normal.

Aplicação	Teste paramétrico
Duas amostras dependentes	Test t-student ou Teste Z
Duas amostras independentes	Test t-student ou Teste Z
Várias amostras independentes	Análise da variância ANOVA (Teste F)

Fonte: Adaptado de TROILA, 2014.

Quando são realizados testes paramétricos, dois tipos de hipóteses são aventadas: a hipótese nula ( $H_0$ ) e a hipótese alternativa ( $H_1$ ). A hipótese nula é a hipótese a ser testada, expressa uma igualdade entre as médias das duas amostras. A hipótese alternativa é dada por uma desigualdade entre as médias das amostras. Quando se realizam testes estatísticos para aceitação ou rejeição da hipótese nula, existem dois possíveis tipos de erros. Pode-se rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira ou aceitá-la quando ela é falsa.

Quando se rejeita  $H_0$ , sendo  $H_0$  verdadeira, comete-se o erro tipo I. A probabilidade associada ao se cometer o erro tipo I é chamada de nível de significância e é representada por  $\alpha$ . Os níveis de significância usualmente adotados são 10%, 5% e 1%. Do outro lado, o erro ao se aceitar a hipótese nula, quando ela é falsa, é denominado erro tipo II, representado por  $\beta$ . Há duas probabilidades associadas aos dois tipos de erros, o nível de confiança ( $1 - \alpha$ ) e o poder do teste ( $1 - \beta$ ). O poder do teste é a probabilidade de se rejeitar a hipótese nula quando ela é falsa, ou seja, a decisão correta (TRIOLA, 2014).

Em geral, a decisão sobre a rejeição ou não rejeição da hipótese nula baseia-se no método do valor P ou no método tradicional de teste de hipótese, sendo ambos descritos no Quadro 1. Este valor de P pode ser facilmente encontrado com o uso de softwares estatísticos como o R utilizado no estudo.

Quadro 1 – Método de Análise do Valor de P.

Se valor de $P \leq \alpha$	Rejeita-se a hipótese nula ( $H_0$ )
Se valor de $P > \alpha$	Rejeita-se a hipótese alternativa ( $H_1$ )

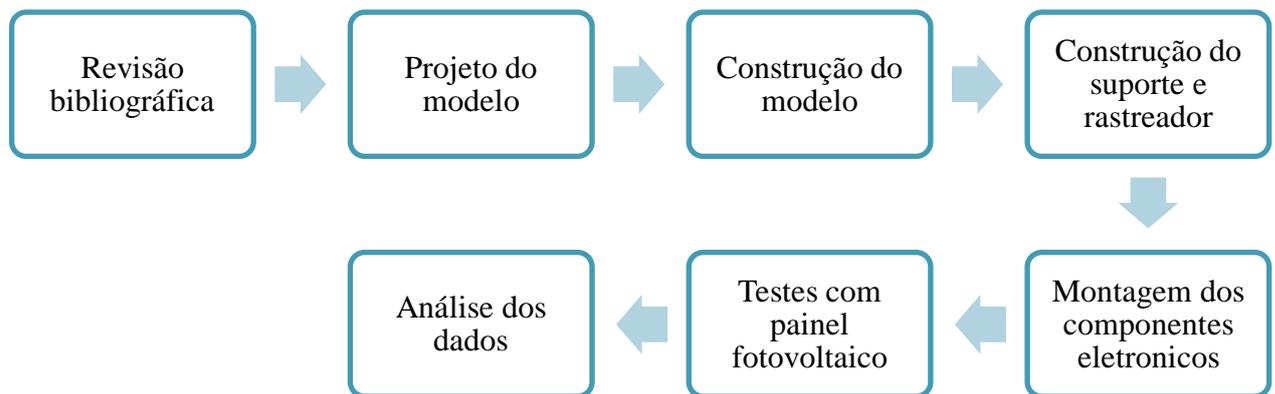
Fonte: Adaptado de TRIOLA, 2014.

### 3. METODOLOGIA

Esta pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Eletromagnetismo e na área externa a este, a céu aberto, dentro do *campus* da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Cerro Largo, Rio Grande do Sul (latitude 28°9'2" S e longitude 54°44'19" W). O projeto foi desenvolvido tendo como o objetivo a fabricação de um modelo de veículo elétrico alimentado por um painel fotovoltaico com sistema de rastreamento solar.

Na construção do referencial teórico foram estudados os conceitos básicos da energia solar e dispositivos rastreadores em que foram avaliadas outras aplicações e sua adaptação para um sistema de rastreamento solar. Assim surgiu a ideia de se trabalhar com a tecnologia Arduino, muito aplicada na área de automação industrial. Foram descobertos modelos de programação simples que poderiam ser adaptados à aplicação do presente projeto facilitando a montagem dos componentes eletrônicos. Desta forma, a primeira parte desta seção abordará a metodologia aplicada para a caracterização do painel fotovoltaico utilizado no estudo. A segunda descreve o desenvolvimento e a construção do veículo e do suporte orientável, assim como o dispositivo de rastreio. A terceira parte refere-se aos testes feitos com o veículo-rastreador. Na Figura 6 pode-se observar um resumo do desenvolvimento do trabalho.

Figura 6– Fluxograma de desenvolvimento do projeto.



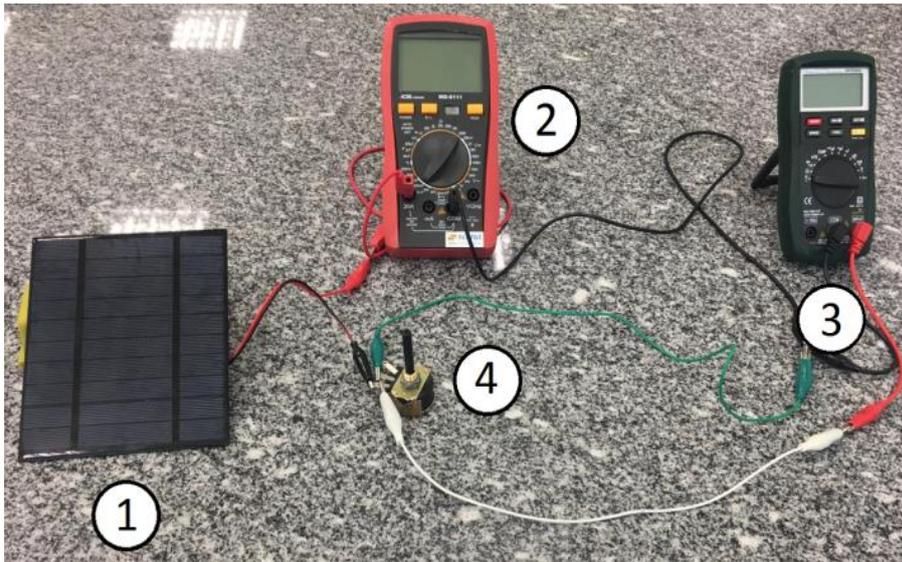
Fonte: Elaborado pela Autora.

#### 3.1. 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 do circuito apresentado na Figura 2, utilizando o painel, amperímetro, voltímetro e um potenciômetro de 500  $\Omega$ , conforme mostra a Figura 7. Um multímetro (ICEL

MD-6111) foi conectado em série com a placa fotovoltaica exercendo a função de amperímetro, ou seja, medindo a corrente da placa, e um segundo multímetro (ICEL MD-6160) foi conectado em paralelo a placa medindo a voltagem. Lembrando que a energia gerada na placa é emitida em corrente contínua, todos estes aparelhos foram configurados com base neste preceito. Após conectou-se o potenciômetro também em paralelo a placa, onde este teve o papel de funcionar como uma carga variável.

Figura 7 – Circuito utilizado para a construção da curva característica.



Fonte: Autora, 2019.

Nota: (1) Painel Fotovoltaico 5V, (2) Amperímetro, (3) Voltímetro e (4) Potenciômetro 500  $\Omega$ .

Após montado o circuito, realizou-se o experimento a campo entre 10 e 11 horas da manhã, onde 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 do potenciômetro. Com o auxílio do EXCEL, utilizaram-se os resultados encontrados para construir-se duas curvas, uma referente à tensão *versus* corrente e outra referente à tensão *versus* potência. Para a determinação da potência utilizou-se a equação 2.

$$P = VI \quad (2)$$

Onde:

$V$  = Tensão (V);

$I$  = Corrente (A);

Para a determinação do fator de forma utilizou-se a equação 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.

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

Onde:

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

$I_{mp}$  = Corrente 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 aferida 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>.

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

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>).

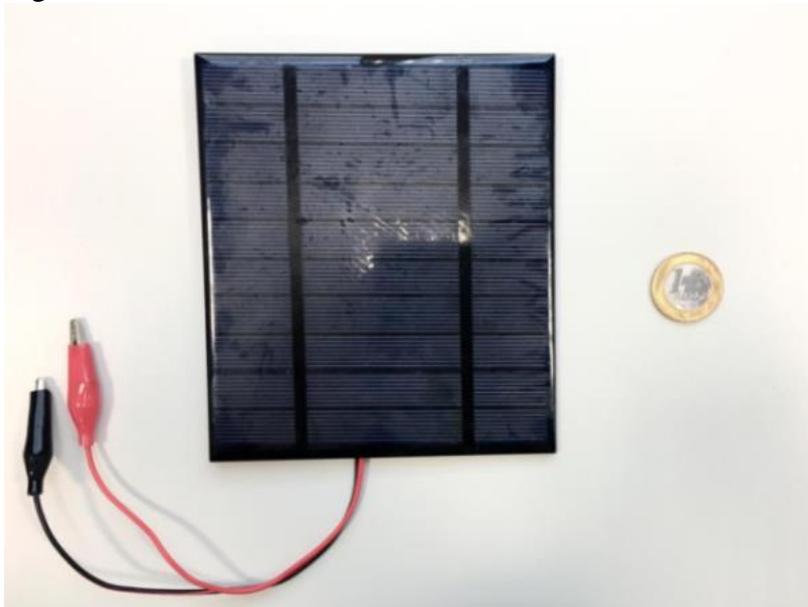
### 3.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO E SUPORTE ORIENTÁVEL

Na construção do modelo de veículo utilizou-se um motor DC com operação de 3 a 6 V e 1W de potência. 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 à medida que o painel fotovoltaico, inicialmente, apenas substitui as pilhas do circuito. O polo positivo do painel foi ligado ao terminal positivo do suporte das pilhas e o polo negativo do painel ao terminal negativo do suporte das pilhas. A única mudança efetuada no circuito foi a retirada do motor responsável

pela mudança de direção do movimento, controlado pelo controle remoto, devido a sua utilização ser dispensável nesta etapa do projeto.

O mini painel solar fotovoltaico utilizado para suprir energeticamente o motor possui dimensões de 150 x 130 mm, e fornece 5V de tensão, 2.5 W de potência e 0.5 A de corrente, conforme pode-se observar na Figura 8. Este foi acoplado sobre a carcaça do modelo por meio de um suporte, eliminando a necessidade do uso de fios extensos que trariam interferências ao movimento. O suporte foi projetado com base nas dimensões do painel, desenhado em software de desenho 3D, seguindo o modelo Pan Tilt que utiliza dois micros servo-motores. Estes motores são responsáveis por possibilitar dois tipos de movimentos: um movimento de rotação no eixo Y (pan) e outro de rotação no eixo X (tilt). A combinação de movimentos nesses dois eixos nos dá uma amplitude de movimento capaz de alcançar as posições necessárias para “encontrar o sol”, conforme ilustra a Figura 9.

Figura 8–Painel solar fotovoltaico 5V.



Fonte: Autora, 2019.

Para a construção do suporte utilizou-se a tecnologia da impressão 3D. As peças do suporte foram confeccionadas e impressas separadamente em plástico ABS e posteriormente utilizadas para a montagem do mesmo. Nesta etapa utilizaram-se peças plásticas e pequenos parafusos. A montagem consistiu na fixação de um servo motor, na parte inferior do suporte, de cabeça para baixo, junto à base. O segundo servo motor foi fixado de lado, na parte de baixo da plataforma superior. As outras peças abraçam o servo inferior, e fixam o braço do servo superior.

Figura 9 – Design do suporte utilizado na confecção do modelo.



Fonte: Google imagens, 2019

### 3.2.1. Desenvolvimento e Construção do Dispositivo de Rastreamento

Para o rastreador foi utilizada a abordagem de rastreamento baseada em sensores LDR, cujo arranjo é capaz de posicionar continuamente o Painel Fotovoltaico (CATARIUS e CHRISTNER, 2010). O dispositivo de rastreamento é composto por um microcontrolador Arduino UNO, dois servos motores, quatro LDR's (Resistência dependente de luz) e quatro resistores de  $10K\Omega$ , para posicionar o painel fotovoltaico de acordo com a luz solar.

O micro controlador Arduino é uma ferramenta que possibilita a interação direta entre o meio físico e cibernético. Na prática, este dispositivo é um pequeno computador que pode ser programado para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes que estejam conectados a ele externamente (MCROBERTS, 2011), podendo ser utilizado para o desenvolvimento de objetos interativos de formas independentes ou pode estar conectado a um computador, a uma rede local ou, ainda, à Internet (BRIDI et al, 2013). A plataforma pode interagir com o ambiente através da conexão com dispositivos que capturam dados do ambiente ou que podem ser controlados, como os sensores de luminosidade.

O Arduino possui código aberto, logo, qualquer pessoa pode utilizar os esquemas ou o projeto. O software utilizado para escrita do código, o IDE (Integrated Development Environment, ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado), é disponibilizado pela equipe desenvolvedora do projeto Arduino disponível em seu endereço eletrônico. Neste ambiente o usuário escreve o código na linguagem que o Arduino compreende baseada na linguagem C/C++ (BRIDI et al, 2013). O dispositivo Arduino utilizado para a construção do rastreador está apresentado na Figura 10.

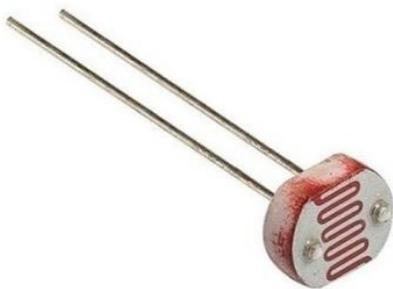
Figura 10–Micro controlador Arduino UNO R3.



Fonte: Autora, 2019.

Os resistores dependentes de luz, ou sensores LDR, são componentes que atuam no circuito captando e mensurando a luz incidente na superfície sensível dos mesmos, ou seja, são dispositivos sensíveis à luz. Estes resistores têm sua resistência dependente da intensidade da luz que incide sobre eles. São construídos a partir de um material semicondutor com elevada resistência elétrica, onde, à medida com que a luz incide sobre o semicondutor faz com que os fótons liberem elétrons para a banda condutora, melhorando a sua condutividade e, assim, diminuindo a resistência. Um sensor LDR pode ser observado na figura 11.

Figura 11–Resistor dependente de Luz.



Fonte: Google Imagens, 2019.

Os servomotores são componentes eletromecânicos, que operam a partir de um sinal elétrico em sua entrada. Estes possuem um sistema eletrônico de controle e um potenciômetro em seu interior que está ligado ao eixo de saída, possibilitando ao circuito de controle o monitoramento do ângulo do eixo do servomotor. Se o eixo estiver no ângulo correto, o motor para. Caso esteja no ângulo incorreto, o motor é ativado até que o ângulo do movimento

corresponda ao ângulo desejado. Nas engrenagens de um servomotor, existe um limitador que atua no ângulo de giro do eixo, fazendo com que este varie de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  (MORAES, 2012).

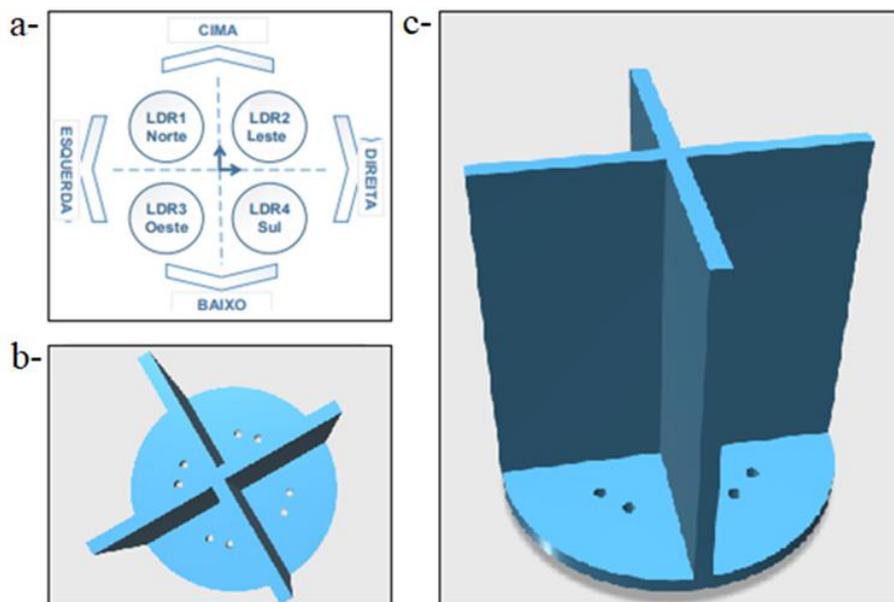
Figura 12 – Servo motor Modelo 9g SG90.



Fonte: TOWER PRO, 2016.

Para a construção do dispositivo de rastreamento, primeiro acoplou-se os servomotores no suporte. Os sensores LDR foram instalados com as orientações norte, sul, leste e oeste, dispostos através de um disco dividido em quatro quadrantes com arestas de cerca de 5 cm, conforme pode-se observar na figura 13. Estas divisórias (arestas) foram construídas com o intuito de se minimizar a interferência da reflexão da luz nas leituras de cada sensor.

Figura 13 – Configuração e estrutura para disposição dos LDR's.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

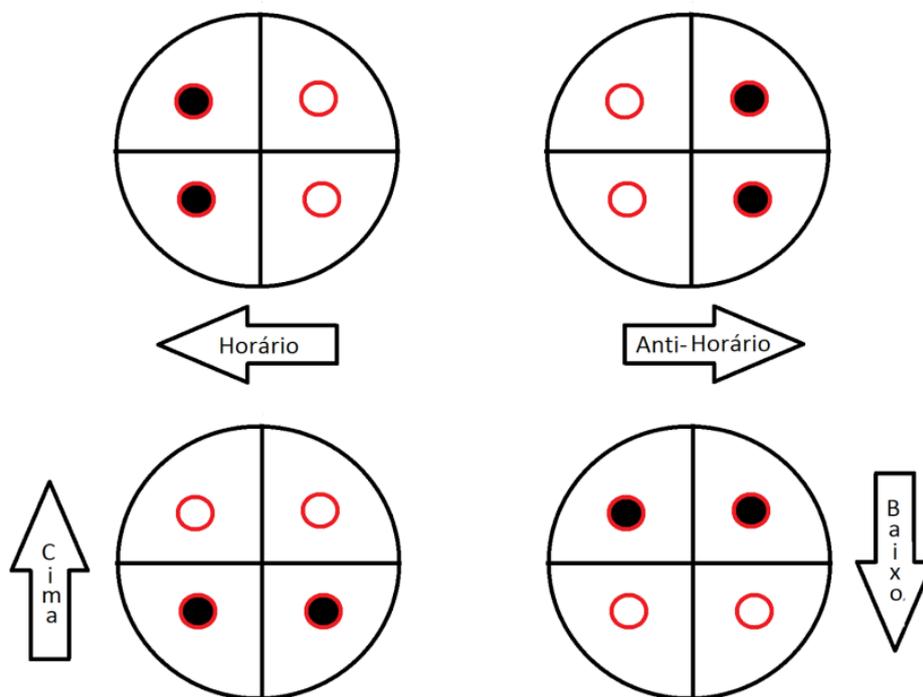
Nota: (a) Configuração dos LDR's; (b) Estrutura para disposição dos LDR's vista superior; (c) Estrutura para disposição dos LDR's vista em perspectiva.

O rastreamento desenvolvido é biaxial dentro da amplitude permitida pelos servomotores, de forma a contemplar os eixos x e y. Estes motores serão responsáveis por realizar os movimentos necessários para este rastreo. O motor colocado na parte inferior do

suporte é responsável pelo movimento azimutal do painel nas direções de esquerda e direita. O motor superior é responsável pela movimentação angular do painel realizando movimentos de cima para baixo, ou de baixo para cima. Os LDR's trabalham em pares, determinando o movimento dos servomotores conforme ilustrado na Figura 14, e estabelecido no algoritmo qual sobre o qual microcontrolador foi programado.

A programação está disponível no anexo A. Esta considera a incidência de luz sobre os sensores e move os servomotores para a direção onde corresponda a maior intensidade. Na posição ideal os quatro sensores devem apresentar valores próximos de tensão. Quando houver uma diferença significativa entre a tensão dos LDR's que formam o par, significa que o eixo correspondente não está perpendicular à direção dos raios solares. Assim, o microcontrolador envia um sinal para os motores fazendo estes se moverem até que o valor entre as tensões (luminosidade) dos LDR's estejam próximos.

Figura 14– Esquema de funcionamento do Rastreo.

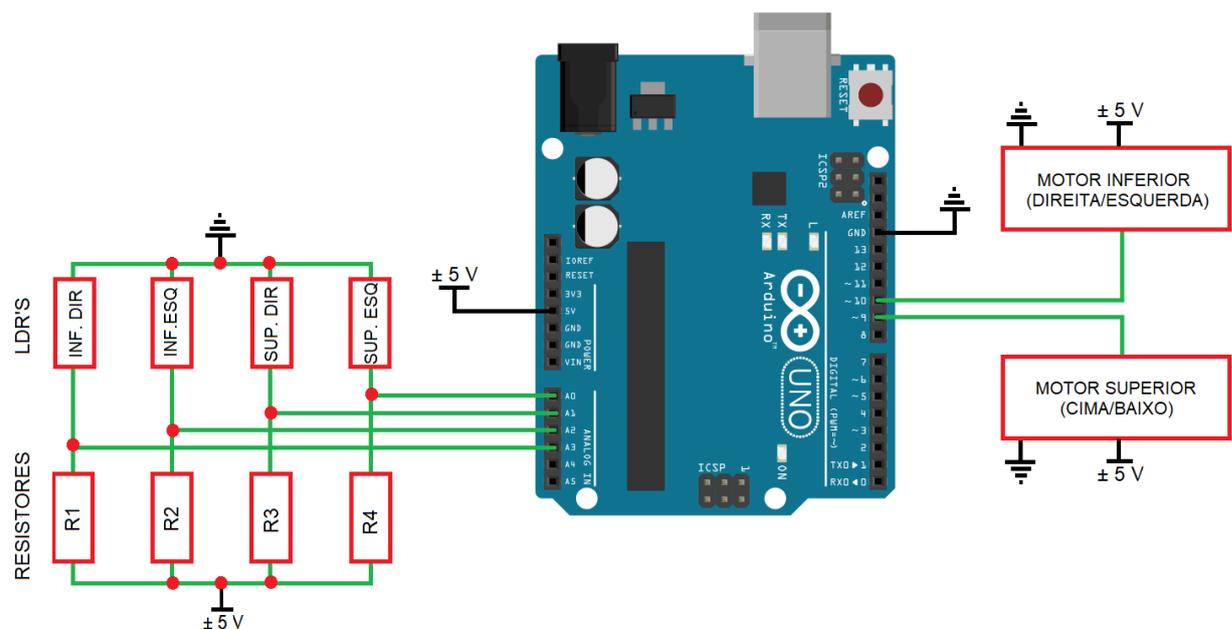


Fonte: Autora, 2019.

Durante a montagem dos componentes eletrônicos do dispositivo foi desenvolvido um processo para estruturação das ligações eletrônicas, onde as conexões estabelecidas no micro controlador Arduino estão apresentadas na Figura 15. Os servo-motores foram conectados ao Arduino através dos pinos 9 e 10, que são uma porta de input/output digital e com função PWM, ou seja, são portas capazes de emular um sinal analógico através de pulsos digitais. A

alimentação dos servomotores foi feita por meio de uma ligação direta ao circuito regulador em GND e de tensão, visando evitar possíveis interferências no funcionamento do micro controlador. Os LDR's responsáveis por coletar as informações referentes à luminosidade foram inseridos, com cabos, aos pinos de input analógico A0, A1, A2 e A3, com alimentação de 5V e GND. No esquema elétrico os resistores estão representados por R1, R2, R3 e R4. Estes foram instalados em série com os sensores LDR's com o objetivo de diminuir a corrente elétrica que vai para o micro controlador.

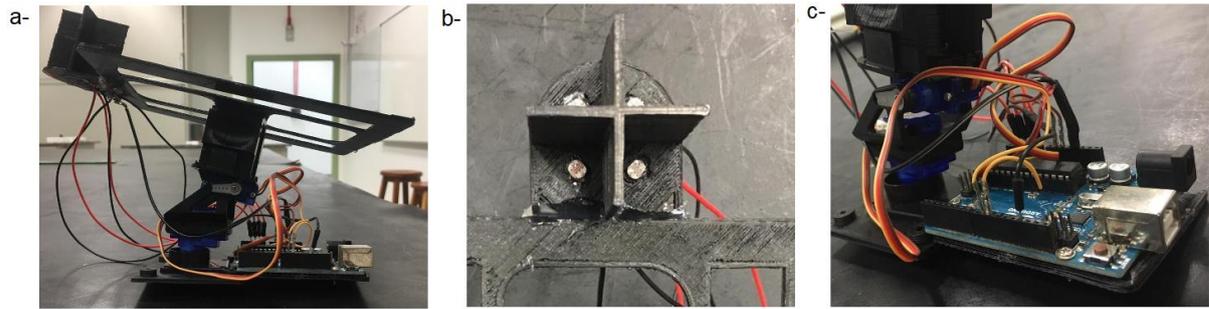
Figura 15– Esquema elétrico do Sistema de Controle.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

Os sensores LDR e os resistores foram dispostos acima da mesa de apoio do painel fotovoltaico. Através de fios conectaram-se estes ao microcontrolador Arduino conforme ilustrado anteriormente. Para não limitar a movimentação dos motores, esses fios possuem um tamanho maior do que o necessário permitindo que o suporte se movimente livre de interferências dentro da sua amplitude. Após a montagem dos componentes eletrônicos, o circuito foi acoplado ao suporte sendo fixado junto à base do servo-motor inferior. O conjunto suporte-rastreador montado nesta etapa do estudo é apresentado na Figura 16.

Figura 16–Resultado final do conjunto suporte-rastreador.

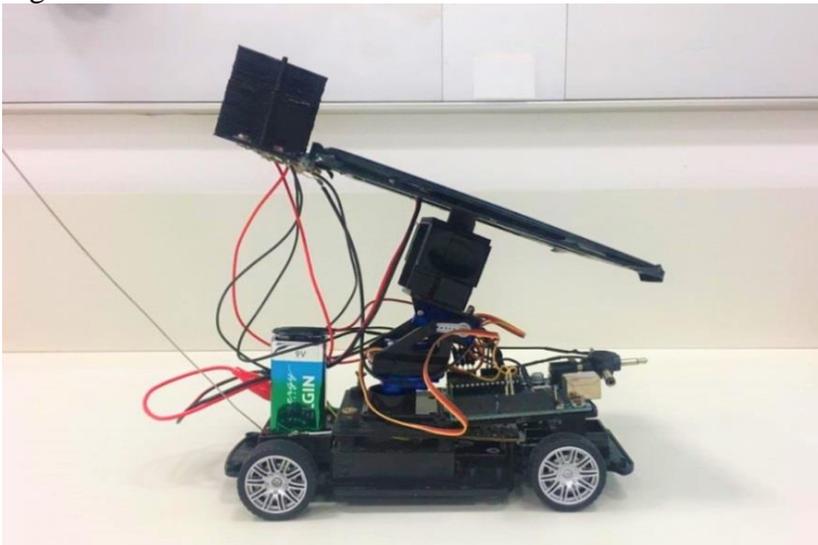


Fonte: Autora, 2019.

Nota: (a) vista lateral, (b) distribuição dos sensores, (c)- microcontrolador Arduino.

Acoplou-se o conjunto suporte-rastreador ao modelo. O suprimento energético do dispositivo foi realizado através de uma porta para alimentação externa de tensão DC, onde, considerando-se que o valor de tensão da fonte externa deve estar entre os limites de tensão DC de 6 a 20V, utilizou-se uma bateria de 9V. Esta bateria foi fixada ao modelo com o uso de cola quente e conectada ao Arduíno com um conector clip. O modelo final pesa 0,324 kg e é apresentado na Figura 17.

Figura 17–Modelo final.



Fonte: Autora, 2019.

### 3.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIO PARA TESTE DO RASTREADOR

Para verificar a eficiência do dispositivo de rastreamento foram realizados testes em dois locais, um no ambiente externo (*campus* universitário) e outro no ambiente interno (laboratório). Para os testes práticos do dispositivo, preferiu-se um ambiente externo por este fornecer uma boa incidência de luz solar aos sensores. O local externo escolhido foi o pátio ao

lado do Prédio do Laboratório 3 da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), em Cerro Largo-RS. Uma área com poucos obstáculos à incidência dos raios solares durante o experimento conforme pode se observar na figura 18. A seguir são apresentados os procedimentos realizados nos locais mencionados.

Figura 18 – Localização do teste de rastreamento em ambiente externo.

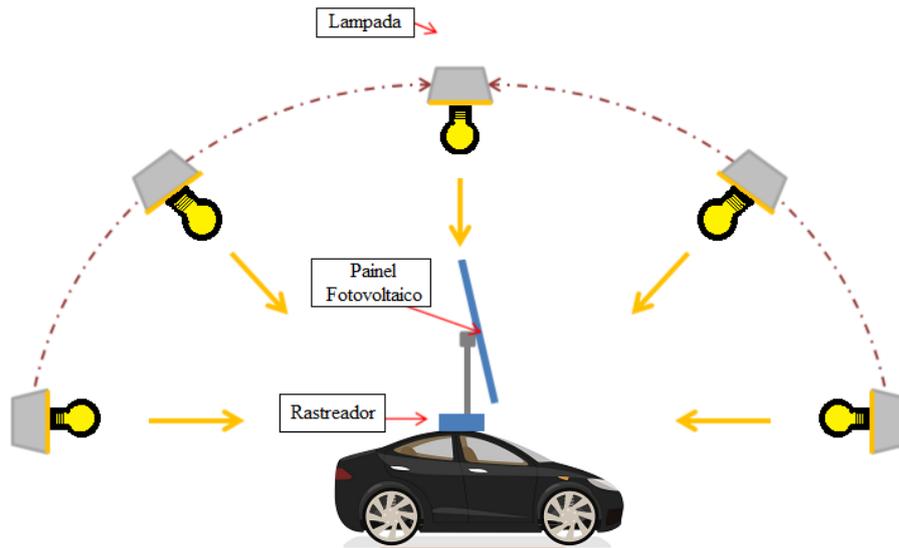


Fonte: Google Earth, 2019.

### 3.3.1 Teste de Rastreamento Móvel no Laboratório

O teste realizado no ambiente interno dos laboratórios teve a finalidade de investigar a resposta do rastreador frente a um ponto com maior incidência de luz. Para a realização desse experimento utilizou-se uma luminária e uma lâmpada fluorescente de 70W. O modelo e a luminária foram dispostos frente a frente sobre a bancada do laboratório. O painel fotovoltaico foi posicionado paralelo ao plano da bancada (posição inicial). Ligou-se a lâmpada na luminária e posteriormente ligou-se a alimentação do dispositivo de rastreamento. Após o início do ensaio se alterou manualmente a posição da luminária repetidas vezes conforme ilustra a Figura 19. Da posição inicial, o dispositivo rastreia a luz através dos sensores se deslocando até a máxima incidência luminosa, deixando o painel fotovoltaico na posição perpendicular à fonte de iluminação.

Figura 19 – Configuração do teste de rastreamento.

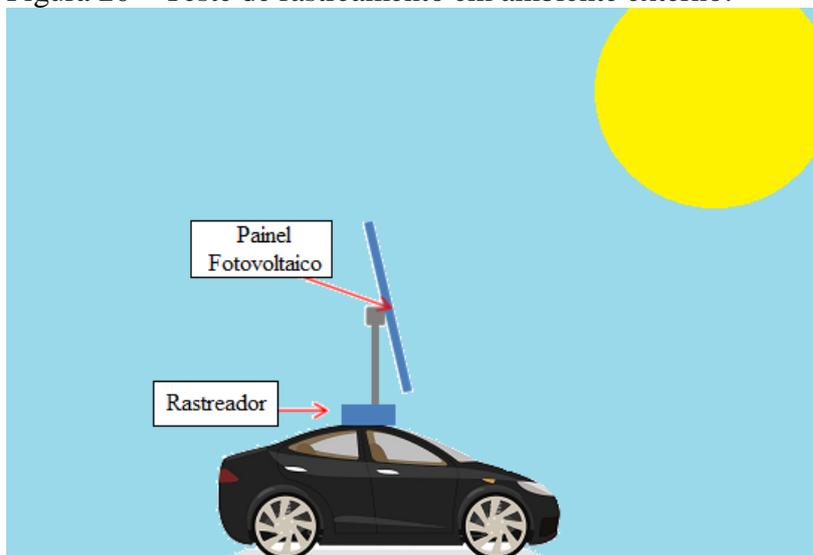


Fonte: Elaborado pela Autora (2019).

### 3.3.2 Teste de Rastreamento Móvel em Ambiente Externo

O período que se realizou este teste foi logo após o término da construção do rastreador, em 1 de outubro de 2019, constando uma temperatura de 25°C, segundo a Estação Meteorológica da UFFS. O experimento teve a finalidade de verificar a resposta do rastreador solar em ambiente externo, sendo a fonte de luz o próprio sol, conforme ilustra a Figura 20. Colocou-se o modelo na posição inicial, alinhado com plano horizontal. Em seguida, ligou-se a alimentação do rastreador e se verificou se o alinhamento azimutal do painel estava correspondendo à região de maior incidência solar.

Figura 20 – Teste de rastreamento em ambiente externo.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

### 3.3.3 Teste de Performance Elétrica

Este experimento avaliou a produção energética do painel fotovoltaico com o uso do rastreador (sistema móvel) e sem o uso do rastreador (sistema fixo). Quantificou-se a potência gerada pelo painel fotovoltaico em um dia parcialmente nublado e em um dia ensolarado, buscando avaliar a interferência das nuvens no dispositivo de rastreamento, visto que nestas situações pode ocorrer um problema na precisão do rastreamento devido à radiação difusa. Neste experimento testaram-se as seguintes hipóteses para em um dia ensolarado e para um dia nublado:

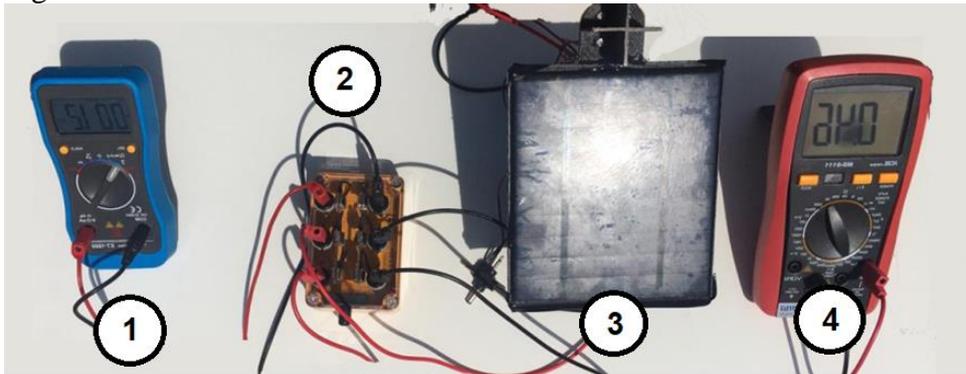
$H_0$  = O uso do rastreador não melhora significativamente o desempenho elétrico do PV.

$H_1$  = O uso do rastreador melhora significativamente o desempenho elétrico do PV.

Se a hipótese  $H_0$  foi aceita significa que não há diferença significativa entre as médias da potência gerada pelos dois sistemas. Se for aceita a hipótese  $H_1$  significa que as médias dos sistemas se diferem significativamente entre si. Para verificar estas hipóteses o modelo foi colocado na área externa dos laboratórios recebendo a radiação solar de forma direta. Dois multímetros dos modelos ICEL MD-6111 e MINIPA ET-1600 foram responsáveis por medir a corrente ( $I$ ) e a tensão ( $V$ ) de saída do painel fotovoltaico, em série e paralelo respectivamente, sendo acionados individualmente por uma chave de alavanca, conforme se pode observar na Figura 21. A alimentação do dispositivo de rastreamento foi ligada e desligada a cada medição que se realizou ao decorrer do dia num período compreendido entre 8h da manhã e 16h da tarde, medindo-se pontos de meia em meia hora, totalizando uma amostra de 17 elementos para cada sistema.

Os testes foram realizados nos dias 12 e 15 de novembro de 2019 com temperatura média, segundo a Estação Meteorológica da UFFS, de 23°C e 27° respectivamente. Registraram-se os valores fornecidos pelo painel frente ao posicionamento paralelo ao plano horizontal, quando desligado o rastreador e frente ao posicionamento fornecido pelo rastreador, quando este estava em funcionamento. O desempenho dos sistemas foi experimentado simultaneamente sob as mesmas condições de radiação e temperatura. A partir dos valores registrados de tensão e corrente determinou-se a potência através da equação 2. Utilizando-se o EXCEL construiu-se um gráfico dos pontos experimentais e suas respectivas curvas para cada caso.

Figura 21– Teste de Performance Elétrica.



Fonte: Autora, 2019.

Nota: (1) Voltímetro, (2) Chave de alavanca, (3) Painel Fotovoltaico (5V) e (4) Amperímetro.

Ressalta-se que neste experimento as medições foram realizadas com o uso de multímetros digitais. Sendo assim, é de suma importância que se levem em conta os erros de medição do instrumento sendo estes: erro de leitura, dado em dígitos indicando quantas unidades o dígito da extremidade direita pode variar e o erro devido à classe, dado em porcentagem da leitura. O erro total da medição corresponde à soma desses dois erros. A partir dos manuais dos instrumentos, disponibilizados pelos fabricantes, para a escala de tensão e corrente contínua pôde-se obter os valores respectivos a esses erros, conforme apresentado nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Dados do multímetro digital MD-6111 para escala de corrente contínua.

Escala	Resolução	Exatidão
200mA	100 $\mu$ A	$\pm (1,2\% + 4d)$
20 <sup>a</sup>	10mA	$\pm (2,0\% + 5d)$

Fonte: Adaptado de Manual De Instruções Do Multímetro Digital Modelo Md-6111, Icel-Manaus.

Tabela 5 - Dados do multímetro digital ET-1600 para escala de tensão contínua.

Escala	Resolução	Exatidão
600 mV	100 $\mu$ V	
6V	1mV	$\pm (0,8\% + 4d)$
60V	10mV	

Fonte: Adaptado de Manual De Instruções Do Multímetro Digital Modelo ET-1600, Minipa.

Considerando estes dados, determinou-se o erro respectivo a cada medida de tensão ( $V$ ) e corrente ( $I$ ) a partir das equações 5 e 6.

$$\sigma_V = V(0,008) + (4(0,001)) \quad (5)$$

$$\sigma_I = I(0,02) + (5(0,01)) \quad (6)$$

Para determinar o erro relativo aos valores calculados de potência (produto da tensão e corrente medida), realizou-se a propagação de incertezas, considerando o erro de cada instrumento. Segundo VUOLO (1998) se os erros nas variáveis de uma determinada grandeza são completamente independentes entre si, a incerteza desta pode ser dada utilizando-se cálculo diferencial. Dessa forma se uma grandeza  $w$  é calculada em função de outras grandezas experimentais  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , sendo o desvio padrão  $\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \dots, \sigma_{x_n}$  as incertezas padrões correspondentes a cada uma delas, a incerteza de  $w$  ( $\sigma_w$ ) pode ser determinada através da seguinte equação:

$$\sigma_w = \sqrt{\left(\frac{\partial w}{\partial x_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x_2} \sigma_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial w}{\partial x_n} \sigma_{x_n}\right)^2} \quad (7)$$

Considerando-se que neste experimento a tensão foi medida ligando-se um multímetro em paralelo com o circuito assumindo-se uma resistência infinita, enquanto a corrente foi medida ligando-se um segundo multímetro em série com o circuito, assumindo uma resistência nula, podemos concluir que as variáveis  $I$  e  $V$  são independentes uma da outra, de forma que o erro da potência calculada pode ser determinado pela equação 9. Os erros individuais de cada medição assim como o erro do valor calculado de potência, estão apresentados juntamente com seus valores nos Quadros 3 e 4.

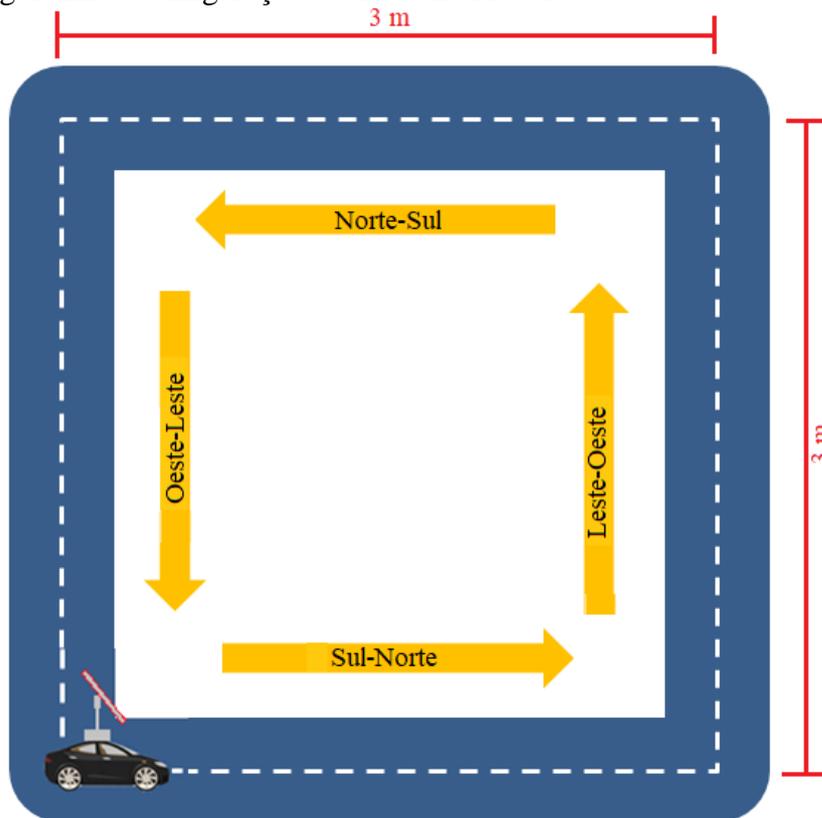
$$\sigma_P = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial I} \sigma_I\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial V} \sigma_V\right)^2} \quad (8)$$

$$\sigma_P = \sqrt{(V \sigma_I)^2 + (I \sigma_V)^2} \quad (9)$$

### 3.4 PROCEDIMENTO DE ENSAIO PARA TESTE NO MODELO

Neste teste avaliou-se a velocidade atingida pelo modelo com e sem o uso do rastreador, buscando verificar a viabilidade do uso deste dispositivo para esta aplicação. Considerando que um veículo está sempre em constante movimento, neste experimento construiu-se um percurso quadrado no qual o modelo percorreu uma distância de 3 metros por reta respectiva a cada direção conforme ilustrado na figura 22.

Figura 22 – Configuração do Teste no Modelo.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

O experimento avaliou a eficiência do rastreador em diversas direções buscando simular o possível movimento de um veículo. O percurso foi dividido em 4 retas de forma que o modelo percorreu cada uma delas separadamente. Para determinar a velocidade ( $v$ ) utilizou-se a equação 6, que corresponde à razão entre a distância percorrida pelo modelo em metros ( $S$ ) e o tempo gasto para percorrer este trajeto, dado em segundos ( $t$ ). Para realizar as medidas dessas grandezas foi utilizado uma trena de 30 metros e um cronômetro digital (Figura 23).

Figura 23 – Instrumentos utilizados no Teste do Modelo.



Fonte: Autora, 2019.

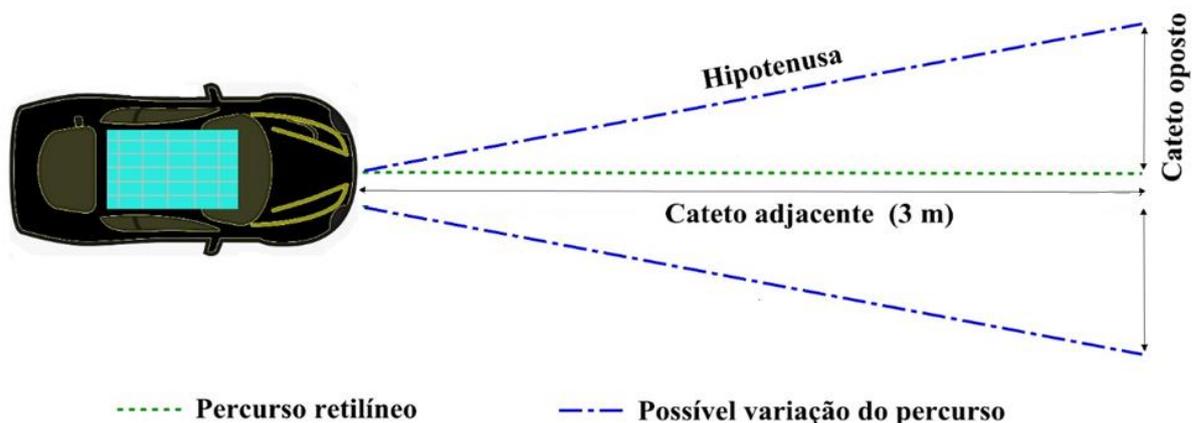
Nota: (a) Trena cinco metros, (b) Cronômetro digital.

Considerando-se a dificuldade de se garantir que o modelo andasse o trajeto em linha reta, para medir a distância percorrida de uma maneira mais precisa e confiável utilizou-se o teorema de Pitágoras. A metodologia de medição está ilustrada na Figura 24. Conhecendo-se o cateto adjacente ( $ca$ ) que teve um valor fixo de 3 metros, correspondente a cada reta do percurso, mediu-se com uma trena o valor do cateto oposto ( $co$ ) e, utilizando-se a equação 7, determinou-se o valor da hipotenusa ( $h$ ), distância real percorrida pelo modelo. Desta forma os valores de  $S$  utilizados no cálculo da velocidade (equação 6) foram correspondentes a distância real percorrida pelo modelo (hipotenusa). A adoção desse método está associado às flutuações do calculado da velocidade associado às possíveis mudanças de direção que o modelo poderia sofrer, tendo em vista a possibilidade do surgimento de algum obstáculo ou interferência durante a realização do trajeto como a presença de pequenas pedras ou algum suave desnível entre os blocos de concreto

$$v = \frac{S}{t} \quad (6)$$

$$h = \sqrt{ca^2 + co^2} \quad (7)$$

Figura 24 – Metodologia de determinação da distância real percorrida pelo modelo.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

Este experimento foi realizado nos dias 11 e 16 de novembro de 2019 com temperaturas médias de 32 e 29°C respectivamente, ambos os dias ensolarados com baixa presença de nuvens. Neste teste não se experimentou a condição de tempo parcialmente nublado devido ao fato da potência produzida nestas condições ser baixa, de modo que o modelo não consegue se locomover. No dia 11 a experimentação ocorreu entre as 9h e 10h30min, enquanto no dia 16 ocorreu entre as 13h e 15h30min. No período compreendido entre as 10h30min e 13h30min não houve experimentação, visto que neste horário o

comportamento dos dois sistemas é muito similar devido ao fato do sol estar a pino e o rastreador se posicionar de forma equivalente ao painel plano. Desta forma este experimento buscou testar as seguintes hipóteses:

$H_0$ =O uso do rastreador não melhora significativamente a velocidade do modelo.

$H_1$ = O uso do rastreador melhora significativamente a velocidade do modelo.

Para possibilitar a comparação entre as hipóteses seria necessário que cada sistema fosse testado sob as mesmas condições de radiação e temperatura, o que implicaria na necessidade de se possuir dois modelos idênticos para realizar a experimentação de forma simultânea. Entretanto, como possuímos apenas um modelo, a velocidade foi medida primeiramente com o rastreador ligado e posteriormente, com o rastreador desligado, mantendo-se o painel fotovoltaico fixo paralelo ao plano horizontal. Buscando-se reduzir o intervalo entre as medições dos sistemas para garantir que ambos fossem experimentados sob as mesmas condições de radiação e temperatura, cada sentido foi experimentado apenas cinco vezes para cada sistema.

### 3.5 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Para realizar a análise estatística dos experimentos onde se testaram hipóteses primeiramente verificou-se a normalidade da distribuição dos dados amostrais através do teste Shapiro-Wilk. Para realizar este teste utilizou-se o software R, onde se obteve um valor de  $p > 0,05$  para todos os grupos amostrais, indicando que estes possuem uma distribuição normal. Diante disto, para investigar as hipóteses aventadas realizou-se o teste de hipóteses t-student com o auxílio do software R.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados experimentais dos ensaios realizados na área interna e externa do Laboratório de Eletricidade e Magnetismo da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), *campus* Cerro Largo. As análises das experiências concluídas foram feitas relacionando-se o comportamento elétrico do sistema fotovoltaico com rastreador e com painel fixo. Apresentam-se os resultados acerca da caracterização do painel fotovoltaico utilizado, da construção do modelo, suporte e rastreador, da geração de potência elétrica obtida pelo suporte fixo e pelo sistema com rastreamento, fazendo, assim, uma comparação entre estes e ainda apresentando dados a respeito do desempenho do modelo em cada um dos sistemas.

### 4.1 CURVA CARACTERÍSTICA

As medições para o levantamento da curva característica estão apresentadas no Quadro 2 com seus respectivos valores de potência e eficiência segundo os procedimentos de PINHO & GALDINO (2014). Os valores de tensão de circuito aberto e corrente de curto circuito foram medidos utilizando multímetros diretamente ligados na placa. O valor da tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) obtida neste experimento correspondeu a 5,66 V enquanto o valor da corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) correspondeu a 0,56 A.

Quadro 2 – Dados obtidos no experimento para a construção da curva característica.

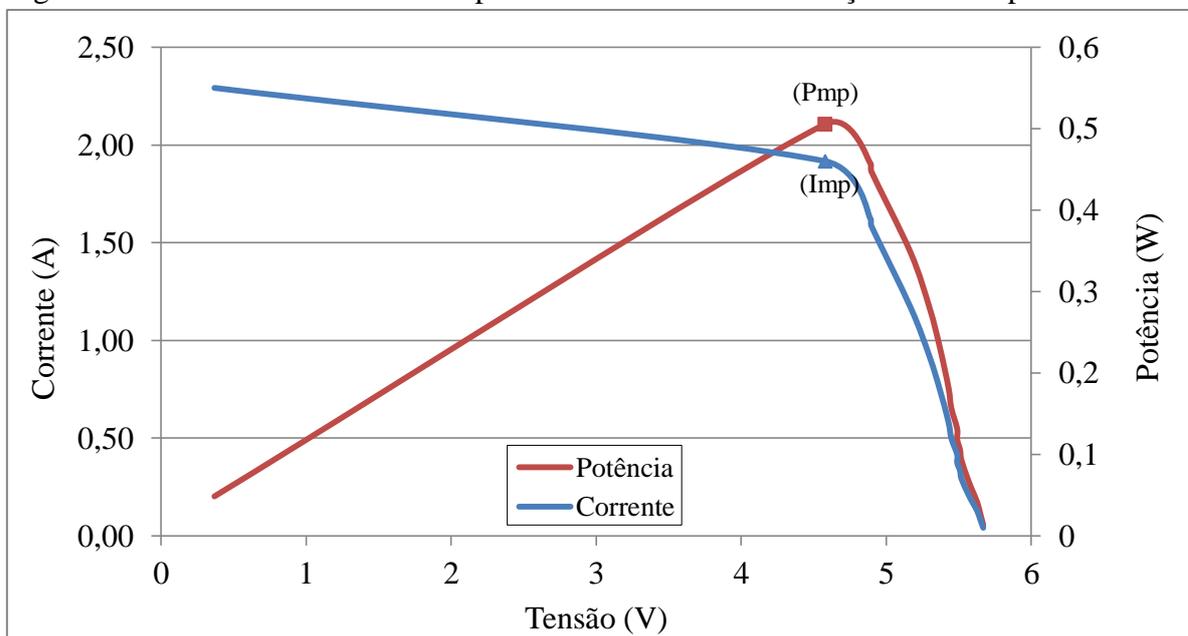
Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Fator de forma	Eficiência (%)
5,67	0,01	0,06	0,02	0,21
5,65	0,02	0,11	0,04	0,42
5,63	0,03	0,17	0,05	0,63
5,60	0,04	0,22	0,07	0,84
5,57	0,05	0,28	0,09	1,04
5,52	0,07	0,39	0,12	1,45
5,51	0,08	0,44	0,14	1,65
5,49	0,09	0,49	0,16	1,85

5,49	0,10	0,55	0,17	2,06
5,45	0,12	0,65	0,21	2,45
5,43	0,140	0,76	0,24	2,85
5,37	0,180	0,97	0,30	3,63
5,30	0,220	1,17	0,37	4,37
5,17	0,280	1,45	0,46	5,43
4,90	0,380	1,86	0,59	6,99
4,89	0,390	1,91	0,60	7,15
4,58	0,460	2,11	0,66	7,90
0,368	0,550	0,20	0,06	0,76

Elaborado pela autora.

Os resultados obtidos acerca da construção da curva característica estão de acordo com a literatura. A Figura 25 mostra a curva característica V x I (tensão x corrente) associada à curva de V x 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%. Estes valores foram utilizados para o dimensionamento do modelo.

Figura 25 – Curva Característica do painel fotovoltaico em condições de Campo.



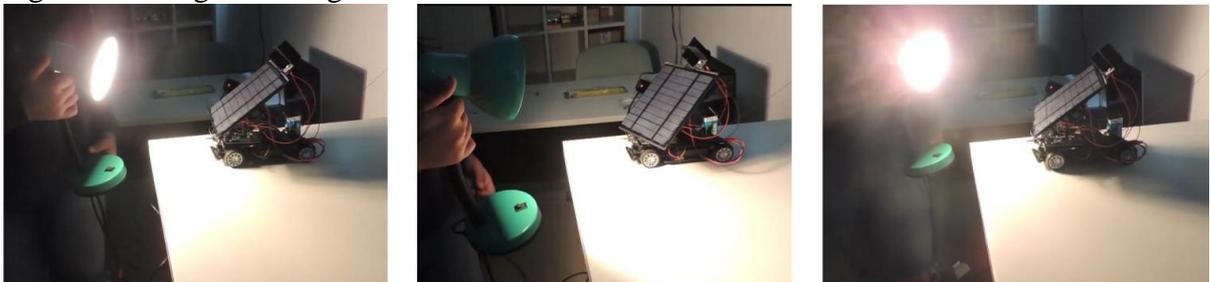
Fonte: Autora, 2019.

#### 4.2 RESPOSTA DO SISTEMA DE RASTREAMENTO

Os testes foram realizados conforme especificado em ambiente interno e externo utilizando-se um painel fotovoltaico dotado de um sistema para rastreamento solar. No ambiente interno utilizou-se como fonte de luz uma iluminação artificial (luminária e lâmpada). Neste experimento o modelo foi mantido sobre a bancada do laboratório, deslocando-se fonte de luz. Desta forma buscou-se avaliar a resposta do rastreador no que diz respeito a sua capacidade de rastreamento da luz conforme se variava a posição da luminária.

Registros fotográficos deste experimento estão apresentados na Figura 26, onde se pode observar o acompanhamento da luz pelo dispositivo. Em ambiente interno a resposta do rastreador foi positiva onde, o mesmo foi capaz de se movimentar sempre em direção à região com a maior intensidade de luz, dentro do seu limite de amplitude. Sendo assim, pode-se inferir que o rastreador está operando de forma adequada e satisfatória.

Figura 26 – Registro fotográfico do teste de rastreamento no laboratório.



Fonte: Autora, 2019.

Posteriormente ao teste realizado em ambiente interno, o modelo foi submetido a um teste similar, porém em ambiente externo. Neste a fonte de luz foi o próprio Sol e quem sofreu deslocamentos foi o modelo, onde se percorreu todo o entorno dos laboratórios a fim de se avaliar a capacidade do dispositivo de rastreamento de se posicionar em direção ao Sol.

Se observarmos a sombra do modelo nos registros fotográficos deste experimento (Figura 27) podemos verificar que o rastreador foi capaz de se posicionar corretamente dentro dos limites de sua amplitude. Assim como no ambiente interno, a resposta do rastreador em ambiente externo foi satisfatória.

Figura 27 – Registro fotográfico do teste de rastreamento em ambiente externo.



Fonte: Autora, 2019.

#### 4.2.1 Teste de Performance Elétrica

Com os dados obtidos nestes experimentos avaliou-se a energia gerada pelo sistema nos dias 12/11/2019 (parcialmente nublado) e 15/11/2019 (ensolarado) nas situações com painel fixo e móvel, onde os resultados obtidos estão apresentados nos Quadros 3 e 4 respectivamente. Foram medidos pontos de meia em meia hora simultaneamente para ambas as situações durante o dia, num período compreendido entre as 8h e 16h, buscando excluir os horários em que a produção de energia do painel é baixa.

Quadro 3 – Dados obtidos no teste de performance elétrica realizado no dia parcialmente nublado (12/11/2019).

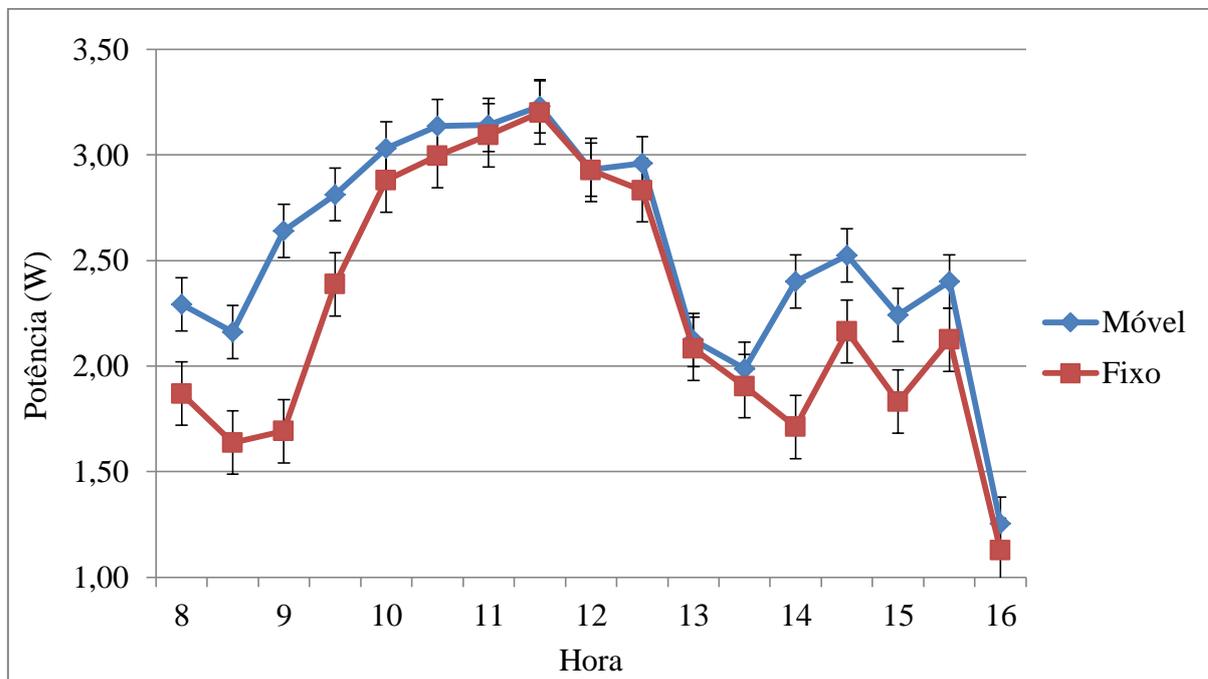
Hora	Móvel			Fixo		
	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	5,73 ± 0,05	0,40 ± 0,06	2,29 ± 0,33	5,67 ± 0,05	0,33 ± 0,06	1,87 ± 0,32
8:30	5,69 ± 0,05	0,38 ± 0,06	2,16 ± 0,33	5,65 ± 0,05	0,29 ± 0,06	1,64 ± 0,32
9:00	5,74 ± 0,05	0,46 ± 0,06	2,64 ± 0,34	5,64 ± 0,05	0,30 ± 0,06	1,69 ± 0,32
9:30	5,74 ± 0,05	0,49 ± 0,06	2,81 ± 0,34	5,69 ± 0,05	0,42 ± 0,06	2,39 ± 0,33
10:00	5,72 ± 0,05	0,53 ± 0,06	3,03 ± 0,35	5,84 ± 0,05	0,49 ± 0,06	2,88 ± 0,35
10:30	5,63 ± 0,05	0,56 ± 0,06	3,14 ± 0,35	5,67 ± 0,05	0,53 ± 0,06	2,99 ± 0,34
11:00	5,54 ± 0,05	0,57 ± 0,06	3,14 ± 0,34	5,61 ± 0,05	0,55 ± 0,06	3,09 ± 0,34
11:30	5,67 ± 0,05	0,57 ± 0,06	3,23 ± 0,35	5,61 ± 0,05	0,57 ± 0,06	3,20 ± 0,35
12:00	5,59 ± 0,05	0,52 ± 0,06	2,93 ± 0,34	5,59 ± 0,05	0,52 ± 0,06	2,93 ± 0,34

12:30	$5,57 \pm 0,05$	$0,53 \pm 0,06$	$2,96 \pm 0,34$	$5,48 \pm 0,05$	$0,52 \pm 0,06$	$2,83 \pm 0,33$
13:00	$5,47 \pm 0,05$	$0,39 \pm 0,06$	$2,12 \pm 0,32$	$5,45 \pm 0,05$	$0,38 \pm 0,06$	$2,08 \pm 0,31$
13:30	$5,45 \pm 0,05$	$0,37 \pm 0,06$	$1,99 \pm 0,31$	$5,44 \pm 0,05$	$0,35 \pm 0,06$	$1,91 \pm 0,31$
14:00	$5,48 \pm 0,05$	$0,44 \pm 0,06$	$2,40 \pm 0,32$	$5,44 \pm 0,05$	$0,32 \pm 0,06$	$1,71 \pm 0,31$
14:30	$5,64 \pm 0,05$	$0,45 \pm 0,06$	$2,53 \pm 0,33$	$5,58 \pm 0,05$	$0,39 \pm 0,06$	$2,16 \pm 0,32$
15:00	$5,47 \pm 0,05$	$0,41 \pm 0,06$	$2,24 \pm 0,32$	$5,44 \pm 0,05$	$0,34 \pm 0,06$	$1,83 \pm 0,31$
15:30	$5,48 \pm 0,05$	$0,44 \pm 0,06$	$2,40 \pm 0,32$	$5,45 \pm 0,05$	$0,39 \pm 0,06$	$2,13 \pm 0,32$
16:00	$5,38 \pm 0,05$	$0,23 \pm 0,05$	$1,25 \pm 0,29$	$5,35 \pm 0,05$	$0,21 \pm 0,05$	$1,13 \pm 0,29$

Elaborado pela Autora.

Através dos valores calculados construiu-se o gráfico da variação horária da potência elétrica gerada pelo painel para os dois sistemas (móvel e fixo) em um dia parcialmente nublado, conforme ilustra a Figura 28. Em dias nublados a oferta de fótons é reduzida, visto que grande parte da radiação solar é refletida pelas nuvens não atingindo a superfície do painel. Nestes casos, podemos observar que o poder de rastreamento do sistema móvel não é capaz de aumentar significativamente a performance elétrica do painel.

Figura 28 –Potência produzida pelo painel em condições de tempo parcialmente nublado (12/11/2019).



Fonte: Elaborado pela autora

No quadro 4 e na figura 29 são apresentados os dados obtidos no teste de performance elétrica para a condição de tempo ensolarado e as respectivas curvas de potência obtidas. É possível observar com mais clareza a otimização atingida com o uso do rastreador solar.

Quadro 4 – Dados obtidos no teste de performance elétrica realizado no dia ensolarado (15/11/2019).

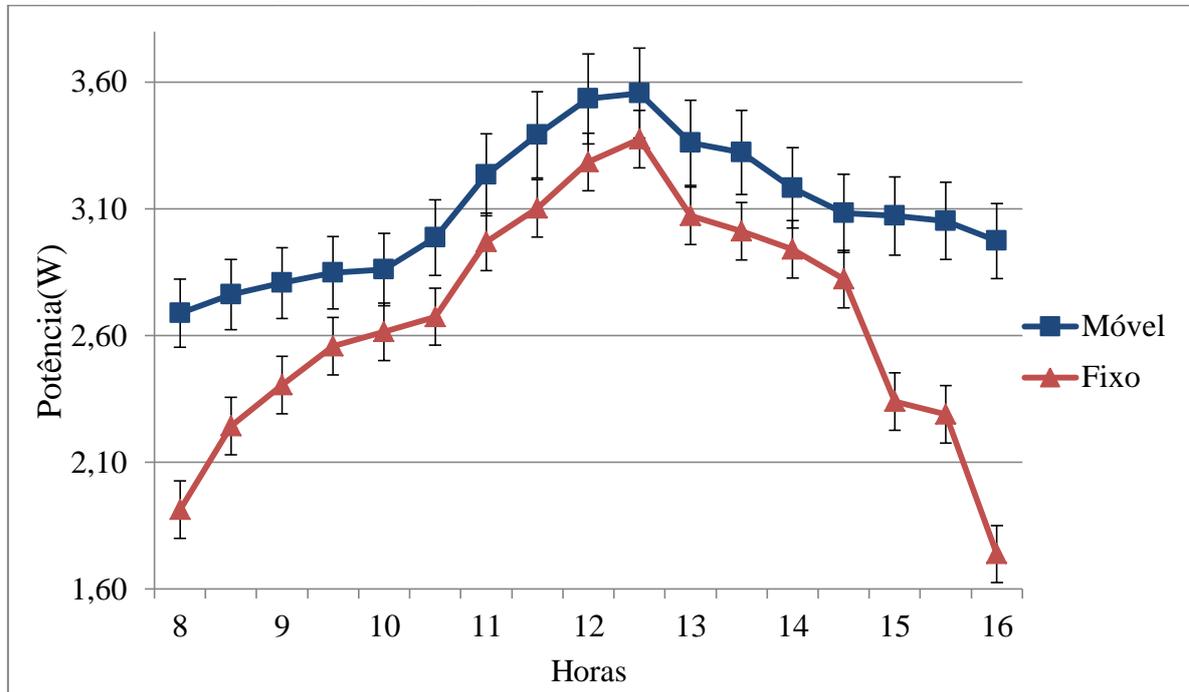
Hora	Móvel			Fixo		
	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência (W)
8:00	5,73 ± 0,05	0,47 ± 0,06	2,69 ± 0,34	5,73 ± 0,05	0,33 ± 0,06	1,91 ± 0,33
8:30	5,89 ± 0,05	0,47 ± 0,06	2,76 ± 0,35	5,77 ± 0,05	0,39 ± 0,06	2,24 ± 0,33
9:00	5,74 ± 0,05	0,49 ± 0,06	2,81 ± 0,34	5,71 ± 0,05	0,42 ± 0,06	2,41 ± 0,33
9:30	5,66 ± 0,05	0,50 ± 0,06	2,85 ± 0,34	5,71 ± 0,05	0,45 ± 0,06	2,56 ± 0,34
10:00	5,64 ± 0,05	0,51 ± 0,06	2,86 ± 0,34	5,71 ± 0,05	0,46 ± 0,06	2,62 ± 0,34
10:30	5,65 ± 0,05	0,53 ± 0,06	2,99 ± 0,34	5,67 ± 0,05	0,47 ± 0,06	2,68 ± 0,35
11:00	5,74 ± 0,05	0,56 ± 0,06	3,24 ± 0,35	5,72 ± 0,05	0,52 ± 0,06	2,97 ± 0,35
11:30	5,76 ± 0,05	0,59 ± 0,06	3,39 ± 0,36	5,71 ± 0,05	0,54 ± 0,06	3,10 ± 0,35
12:00	5,82 ± 0,05	0,61 ± 0,06	3,53 ± 0,36	5,73 ± 0,05	0,57 ± 0,06	3,29 ± 0,35
12:30	5,83 ± 0,05	0,61 ± 0,06	3,56 ± 0,36	5,79 ± 0,05	0,58 ± 0,06	3,38 ± 0,36
13:00	5,73 ± 0,05	0,59 ± 0,06	3,36 ± 0,35	5,72 ± 0,05	0,54 ± 0,06	3,07 ± 0,35
13:30	5,74 ± 0,05	0,58 ± 0,06	3,32 ± 0,35	5,73 ± 0,05	0,53 ± 0,06	3,01 ± 0,35
14:00	5,85 ± 0,05	0,54 ± 0,06	3,18 ± 0,36	5,87 ± 0,05	0,50 ± 0,06	2,94 ± 0,35
14:30	5,77 ± 0,05	0,53 ± 0,06	3,08 ± 0,35	5,72 ± 0,05	0,49 ± 0,06	2,82 ± 0,34
15:00	5,81 ± 0,05	0,53 ± 0,06	3,07 ± 0,35	5,72 ± 0,05	0,41 ± 0,06	2,34 ± 0,33
15:30	5,74 ± 0,05	0,53 ± 0,06	3,05 ± 0,35	5,74 ± 0,05	0,40 ± 0,06	2,29 ± 0,33
16:00	5,89 ± 0,05	0,51 ± 0,06	2,97 ± 0,35	5,74 ± 0,05	0,30 ± 0,06	1,74 ± 0,32

Elaborado pela Autora.

Para este caso pode-se notar que durante as primeiras e as últimas horas de sol do dia a geração fotovoltaica do painel solar fixo é mais baixa, pois durante este período ele não está

direcionado para a maior incidência solar, ao contrário do que se pode observar no painel com rastreamento ligado, onde a geração de energia nestes horários é maior visto que através do rastreador o painel é direcionado para maior incidência de luz, fazendo com que o painel aproveite mais a radiação do sol.

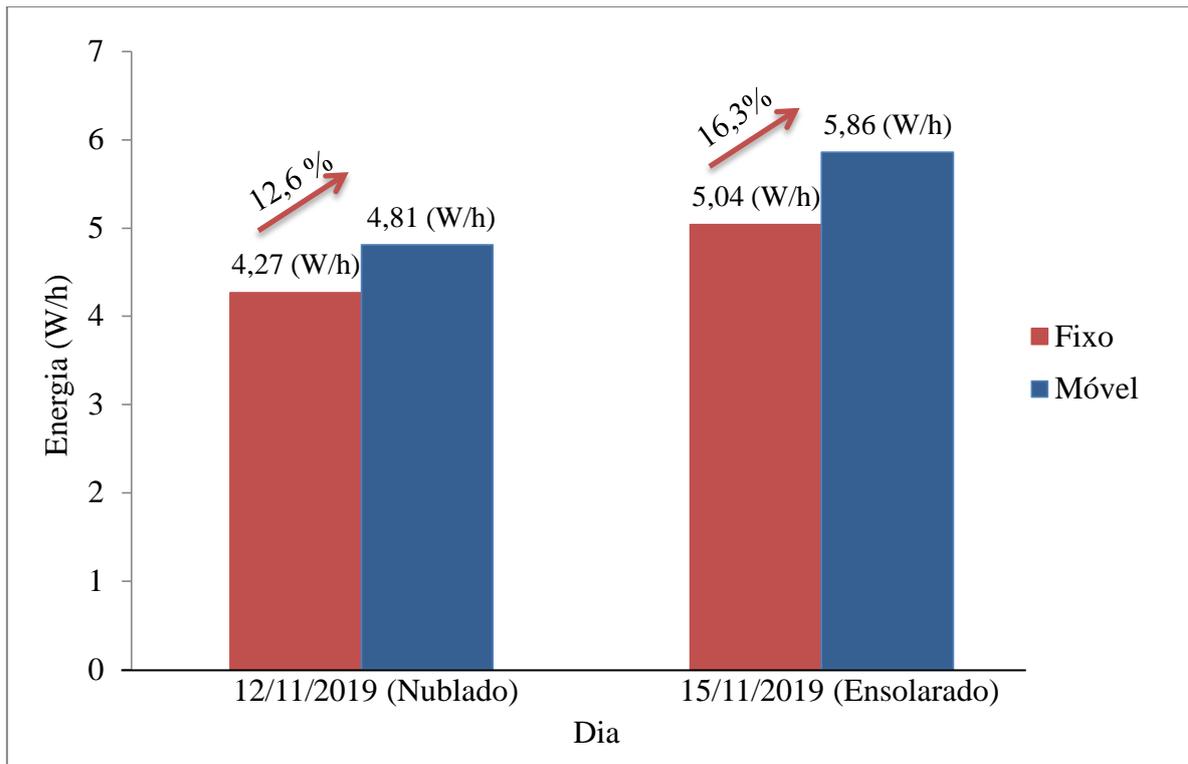
Figura 29– Potência produzida pelo painel em condições de tempo ensolarado (15/11/2019).



Fonte: Elaborado pela Autora.

O aumento percentual observado na geração de energia produzida nas datas específicas podem ser mensurados ao consideráramos a potência total (W) gerada pelo painel em relação as horas experimentadas. No dia 12/11/2019, foi gerado em média uma potência de 4,27 W/h no sistema fixo e 4,81W/h no sistema móvel. Já no dia 15/11/2019 a geração média de potência elétrica do painel fixo foi de 5,04 W/h enquanto do painel móvel foi de 5,86 W/h. Hipoteticamente podemos verificar que o uso do rastreador solar no painel fotovoltaico aumentou a produção de potência em 12,6% para um dia parcialmente nublado e 16,3% para um dia ensolarado conforme podemos observar na figura 30.

Figura 30 – Potência média total produzida nos experimentos.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

Estes resultados se aproximam dos resultados obtidos por ZHAN (2013) que registrou um aumento na potência do PV móvel na faixa de 8 a 11% para um dia nublado e 17 a 25% para um dia ensolarado em comparação a um PV fixo. Entretanto este autor não relatou o período do ano em que o experimento foi realizado impossibilitando uma comparação equivalente entre os valores.

FREITAS (2019) e ORTIZ (2018) também testaram a eficiência de um PV móvel em relação a um PV fixo obtendo uma melhoria 24,52% e 21% respectivamente na produção média de potencia gerada no sistema móvel em relação ao fixo. Estes dados estão um pouco distante dos obtidos no presente estudo. Contudo vale-se ressaltar que a localização do teste é de suma importância, visto que a incidência solar varia conforme a latitude. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar o estado de Goiás, local onde se realizou o experimento de FREITAS (2019) apresenta uma radiação incidente de 5,26 kWh/m<sup>2</sup>, cerca de 22% superior a radiação média do Rio Grande do Sul. Assim como o estado de São Paulo que apresenta índices de radiação solar a níveis de 6,25 kWh/m<sup>2</sup>, 38% superior radiação incidente no território gaúcho.

A comparação estatística entre as hipóteses, realizada por meio do teste t-Student rejeitou H<sub>0</sub> para um nível de 95% de confiança no dia ensolarado, ou seja, nestas condições o

uso do rastreador melhora significativamente a performance elétrica do painel. Para o dia nublado a hipótese  $H_0$  foi aceita para um nível de 95% de confiança, ou seja, nesta condição não existe diferença significativa entre as medidas de potência obtidas, logo não se existe vantagem no uso do dispositivo rastreador para esta condição.

Em dias nublados, devido à baixa radiação solar direta, a influência da orientação do painel fotovoltaico acaba se tornando insignificante em relação a sistemas fixos. Nestas condições, por vezes o sistema fixo pode funcionar até melhor que o sistema orientado visto que nesses dias a atmosfera é pouco transparente, absorvendo, refletindo e espalhando mais radiação solar, causando assim a redução da transmissão de radiação direta. Desta forma a maior parte da energia luminosa convertida em energia elétrica é proveniente da radiação difusa que se espalha pelo ambiente podendo ser captada em maiores quantidades pelo painel horizontal do que pelo painel inclinado.

#### **4.2.2 Teste do Modelo**

Os resultados obtidos neste experimento para manhã e tarde estão apresentados na Tabela 6, onde se pode observar a velocidade média respectiva a cada sentido conforme o dia e período analisado. A última coluna desta tabela apresenta a variação percentual (velocidade do sistema móvel em relação à velocidade do sistema fixo) entre as medidas de cada sistema. O erro dessas médias foi calculado com o uso do software R.

Ressalta-se que neste experimento não se buscou discutir a velocidade isolada do modelo, mas sim a diferença entre as velocidades obtidas com e sem o uso do rastreador, visando quantificar em porcentagem a melhoria obtida no processo de conversão de energia atingida com o uso do dispositivo. Analisando-se esses dados podemos observar que em todas as medidas a velocidade média obtida no sistema móvel foi superior à obtida no sistema fixo.

Tabela 6 – Velocidades obtidas no teste do modelo para os dias 11/11/2019 e 16/11/2019.

Dia	Hora	Sentido	Móvel (m/s)	Fixo (m/s)	$\left(\frac{v_m}{v_f}\right) - 1$
Manhã (11/11/2019)	09:00	Norte-Sul	0,80 ± 0,05	0,56 ± 0,04	42,8%
	09:30	Oeste-Leste	0,85 ± 0,02	0,66 ± 0,02	28,8%
	10:00	Norte Sul	0,69 ± 0,03	0,55 ± 0,07	25,4%
	10:30	Leste-Oeste	0,84 ± 0,02	0,72 ± 0,01	16,7%
Tarde (16/11/2019)	13:30	Sul-Norte	1,00 ± 0,02	0,90 ± 0,02	11,1%
	14:00	Oeste-Leste	0,71 ± 0,03	0,55 ± 0,04	29,1%
	14:30	Norte-Sul	0,94 ± 0,02	0,65 ± 0,01	44,6%
	15:00	Leste-Oeste	0,98 ± 0,04	0,67 ± 0,04	46,3%

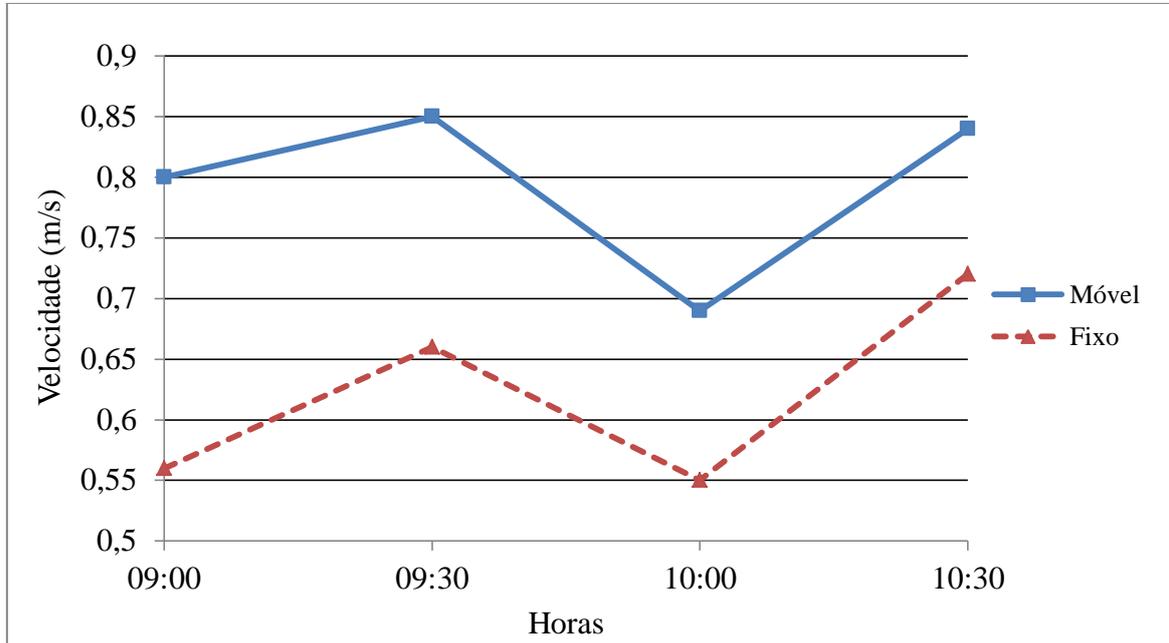
Fonte: Elaborado pela Autora.

O teste de performance elétrica de geração com e sem o uso do rastreador, demonstrou que a eficiência do rastreador em relação ao sistema fixo é maior nas horas iniciais e finais do dia, fato que pode ser explicado devido ao movimento azimutal do sol onde o rastreador perde significativamente sua eficiência à medida que se aproxima do horário das 12 horas (meio dia).

Na análise das velocidades também se pôde observar este mesmo comportamento, onde a maior variação percentual de cada experimento ocorreu às 9h e 15h. Nestes horários pôde se verificar um aumento de 42,8% e 46,3% respectivamente nas velocidades obtidas no sistema móvel em relação ao fixo. A menor variação entre as velocidades foi observada às 10h30min e 13h30min, onde a velocidade média atingida pelo modelo no sistema móvel foi apenas 16,7% e 11,1% respectivamente superior à velocidade atingida no sistema fixo. Durante alguns sentidos experimentados o Sol estava atrás do modelo, onde, devido a limitação do rastreador o PV não conseguiu se manter de forma perpendicular aos raios solares o que causou uma certa flutuação nas velocidades registradas, conforme pode se

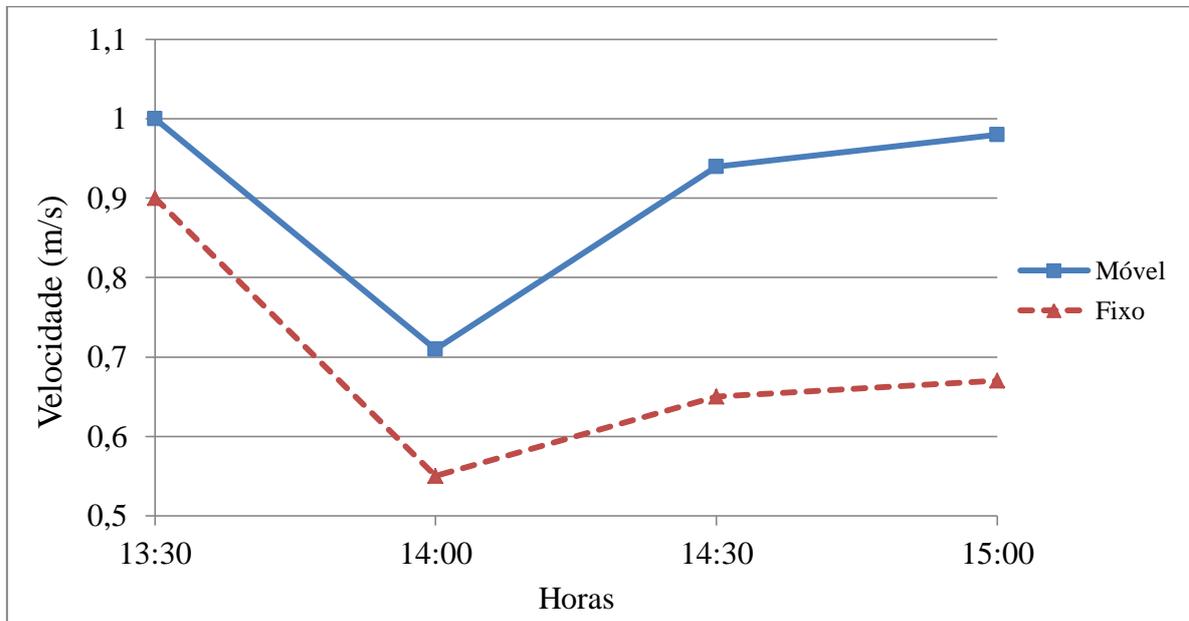
observar nas figuras 31 e 32 que apresentam a variação horária dos valores de velocidade para os dois períodos experimentados.

Figura 31 – Variação da velocidade registrada no modelo para o sistema móvel e fixo no teste realizado de manhã (11/11/2019).



Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

Figura 32 – Variação da velocidade registrada no modelo para o sistema móvel e fixo no teste realizado de tarde (16/11/2019).



Fonte: Elaborado pela Autora, 2019.

O valor médio da velocidade atingida no sistema móvel foi de 0,85 m/s, enquanto para o sistema fixo 0,65 m/s. Assim podemos verificar que o uso do rastreador foi capaz de aumentar aproximadamente 31% da velocidade do modelo.

AL-MIN (2014) criou um modelo similar a este, porem utilizou uma diferente tecnologia de rastreamento e equipamentos mais potentes. Em seu trabalho, o referido autor obteve uma velocidade média de 1,01 m/s, onde se considerarmos as peculiaridades de cada modelo podemos considerar que a velocidade obtida no presente estudo, de 0,85 m/s está conforme o esperado pela literatura. Já a velocidade obtida no sistema fixo, de 0,65 m/s, se aproxima de valores encontrados por ASHRAFEE (2014) e SHAZIB UDDIN (2015). Entretanto, considerando que cada estudo relacionado ao rastreador solar é influenciado pela localização a qual o mesmo é realizado, devido à latitude do local, as condições climáticas e os efeitos dos dias e noites mais longos, se torna muito complicado realizar comparações justas entre os trabalhos.

Na comparação estatística acerca das hipóteses houve rejeição de  $H_0$  para um nível de 95% de confiança, o que comprova que o uso do rastreador realmente é capaz de melhorar significativamente a velocidade do modelo de veículo elétrico, se caracterizando assim como uma proposta para maximizar a geração fotovoltaica e aumentar seu uso nesta aplicação.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta deste estudo foi sugerir uma tecnologia para aumentar a performance elétrica dos painéis fotovoltaicos visando sua aplicação em veículos elétricos, para minimizar futuramente as emissões atmosféricas geradas pelo uso de combustíveis fósseis. O design do rastreador solar foi profundamente investigado. Apesar de este trabalho ser de pequeno porte, e não possuir uma programação muito complicada desenvolvê-lo foi um desafio que foi se resolvendo com o passar do tempo. Dentre as dificuldades encontradas no desenvolvimento do projeto pode-se apontar a complexidade da montagem do dispositivo de rastreamento devido à pequena dimensão dos componentes deste e a falta de equipamentos para realizar as medições da velocidade do modelo de forma mais precisa.

Os testes de performance elétrica do PV foram realizados para um dia ensolarado e um dia parcialmente nublado, buscando-se analisar a eficiência do dispositivo nas mencionadas condições. Este experimento levou em conta dados registrados nos dias 12 e 15 de novembro de 2019 devido à falta de equipamentos necessários para realizar este monitoramento de forma contínua por longos períodos tempo. Neste, avaliou-se a variação da energia produzida no sistema móvel e fixo com o intuito de quantificar em termos percentuais o aumento na produção energética atingido com o dispositivo rastreador. O teste do modelo também levou em conta apenas os dados registrados nos dias 11 e 16 de novembro de 2019, devido ao fato de este experimento ter o intuito de verificar a relação entre as velocidades obtidas nos sistemas.

Durante os testes o sistema móvel funcionou perfeitamente seguindo sempre a maior incidência de luz dentro dos limites de sua amplitude. Os resultados obtidos acerca da performance elétrica do painel demostram com 95% de confiança que utilizar o rastreador solar em dias ensolarados pode aumentar até 16,3% da energia produzida por este. Já em dias nublados não se observou vantagem com o uso deste dispositivo. No modelo, a velocidade média obtida com o uso do rastreador foi de 0,85 m/s cerca de 30% superior a obtida sem o uso deste dispositivo. Assim, com 95% de confiança podemos concluir que utilizar esta tecnologia em veículos elétricos pode melhorar significativamente seu desempenho.

Vale-se ressaltar que dispositivos rastreadores necessitam consumir energia para seu funcionamento, devido ao fato de utilizarem sistemas eletrônicos em conjunto com motores elétricos para alterar a posição dos painéis fotovoltaicos, de forma que, em escalas maiores antes de se implementar estes dispositivos deve-se analisar primeiramente a viabilidade destes de acordo com a aplicação desejada. Assim para trabalhos futuros deseja-se avaliar o consumo energético do rastreador construído verificando se o aumento na energia captada

pelo PV é maior que a energia consumida para manter o dispositivo em funcionamento. Ainda deseja-se estudar o desempenho do rastreador solar ao longo de todo o ano em diferentes condições climatológicas. O aperfeiçoamento deste sistema pode ser o ponto de partida para novas pesquisas e desenvolvimento de novos rastreadores, podendo agregar conhecimento e incentivo para a sociedade na área de produção de energia fotovoltaica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLAH S, NIJMEH S. **Two axes sun tracking system with PLC control**. Energy Conversion and Management, Vol.45, pág. 1931–1939, 2004.

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

ALVARES, C.A.; STAPE,J.L.; SENTELHAS, J.L.M. **Modeling monthly mean air temperature for Brazil**. Theor. Appl. Climatol. Vol. 113, pág. 407–427, 2013.

AL-AMIN, M.; CHOWDHURY, N. B.; RABBY, F.; BANIK, S. C. B.; ISLAM, Z. **Study Of Construction And Analysis Of A Vehicle Using Solar Energy With Solar Tracking System**. International Journal of Novel Research in Electrical and Mechanical Engineering, Vol.1, pág. 44-50, Bangladesh, 2014.

ANFAVEA (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES). **Estatística 2017 – Autoveículos (Produção, licenciamento, exportações em unidades de montados e CKD, exportações em valor e emprego)**. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/estatisticas-2017.html>>. Acesso em 10 de junho de 2019.

ANFAVEA (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES). **Estatística 2018 – Autoveículos (Produção, licenciamento, exportações em unidades de montados e CKD, exportações em valor e emprego)**. Disponível em:< <http://www.anfavea.com.br/estatisticas-2018.html>>. Acesso em 10 de junho de 2019.

ASHRAFEE, F.; MORSALIN, S.; REZWAN, A.**Design and fabrication of a solar powered toy car**.International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology, 2014.

ASSAF, A. M. **Design and Implementation of a Two Axis Solar Tracking System Using PLC Techniques by an Inexpensive Method**. International Journal of Academic Scientific Research, Vol. 2, nº 3, pág. 54-65, 2014.

BARACHO, G. M. **Veículos Elétricos: Estudo Preliminar Das Estratégias De Suprimento De Energia Por Eletroposto Solar Fotovoltaico**. Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília (UnB) – Faculdade do Gama (FGA), Brasília, 2016.

BEUME, 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.

BHASKAR, K.; YUVARAJ, K. **Solar powered vehicle under GSM network by using solar tracking & monitoring.** Int J Eng Dev Res, Vol. 4, pág. 263-270, Índia, 2016.

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.

BRIDI, E. et al. **Oficina De Arduíno Como Ferramenta Interdisciplinar No Curso De Engenharia Elétrica Da UFMT: A Experiência Do Pet-Elétrica.** Gramado, Rio Grande do Sul, 2013.  
Disponível em: <<https://www.ufmt.br/ufmt/site/userfiles/eventos/33c3ac5396238d7ddadcba87c9aad4d.pdf>>. Acesso em 20 de outubro de 2019. Acesso em: abril de 2016.

CAMPOS, M. G. **Estatística Prática para Docentes e Pós-Graduandos.** Universidade de São Paulo, Riberão Preto, São Paulo, 2017.

CCST/LABREN/INPE. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** 2ª Edição. São Paulo, 2017.

CIRILLO, M. A.; FERREIRA, D. F. **Extensão do Teste para Normalidade Univariado Baseado no Coeficiente de Correlação Quantil para o Caso Multivariado.** Revista de Matemática e Estatística, São Paulo, Vol. 21, n. 3, pág 67–84, 2003.

CRESESB (CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO). **Potencial Solar - SunData.** Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em 10 de junho de 2019.

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, Bangladesh, 2019.

CORTEZ, R. J. M. **Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica.** Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Porto, Porto, 2013.

DANCEY, C. P.; REIDY, J. **Estatística sem Matemática para Psicologia: usando SPSS para Windows.** 3ª Ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.

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.

DHANABAL, R.; BHARATHI, V., PONNI, R. R. A.; DEEPTHI S.; MAGESHKANNAN, P. **Comparison of Efficiencies of Solar Tracker systems with static panel Single-Axis Tracking System and Dual-Axis Tracking System with Fixed Mount.** International Journal of Engineering and Technology (IJET), Vol. 5, nº 2, pág. 425-429, 2013.

FATHABADI, H. **Comparative study between two novel sensorless and sensor based dual-axis solar trackers.** Solar Energy, Vol. 138, pág. 67–76, 2016.

FONTES, R. **Como Carros Movidos a Energia Solar Já São Uma Realidade Acessível e Como Você Pode Ter o Seu.** BlueSol – Energia Solar, 2019. Disponível em:<<https://blog.bluesol.com.br/carros-movidos-a-energia-solar/>>. Acesso em 10 de junho de 2019.

FREITAS, G. A. **Eficiência energética de um painel fotovoltaico com rastreador solar baseado em sensores LDR comparado a um painel em ângulo fixo.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Gestão e Inovação na Indústria Animal. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

GIANNOULI, M.; YIANOULIS, P. **Study on the incorporation of photovoltaic systems as an auxiliary power source for hybrid and electric vehicles.** Solar Energy, Vol.86, pág. 441-451, 2012.

GIL, F. J. G; MARTÍN, G. S.; VARA, J. P.; CALVO, J. R. **A review of solar tracker patents in spain.** WSEAS International Conference On Renewable Energy Sources, nº3, pág. 292-297, Espanha, 2009.

GUARIEIRO, 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.** Porto Alegre, UERGS, 2018.

KAGAN, N.M.; GOUVEA, F.; MAIA, D.; DUARTE, J.; LABRONICI, D.S.; GUIMARÃES, A.; BARRETO, J. F. R. **Redes elétricas inteligentes no Brasil: análise de custos e benefícios de um plano nacional de implantação.** Rio de Janeiro: Synergia, 2013.

LIMA, D. O.; SOGABE, V. P.; CALARGE, T. C.C. **Uma análise sobre o mercado mundial do biodiesel**. 46º Congresso da Sociedade Brasileira De Economia, Administração E Sociologia Rural (Sober). Rio Branco, Acre, 2008.

LODI, C.; SEITSONEN, A.; PAFFUMI, E.; GENNARO, M.; HULD, T.; MALFETTANI, S. **Reducing CO<sub>2</sub> emissions of conventional fuel cars by vehicle photovoltaic roofs**. Transportation Research Part D: Transport and Environment. Vol.59, pág. 313-324, 2018.

MARTINS, F. O. **Seguidor solar de dois eixos com motores passo-a-passo**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2016.

MCROBERTS, Mi. **Arduino Básico**. São Paulo: Novatec Editora. Pág. 22 – 24, 2011.

MORAES, E. P. **Seguidor Solar De Um Único Eixo Inclinado**. Distrito Federal, Brasília. Centro Universitário De Brasília - UNICEUB, 2012. Disponível em: <<http://www.repositorio.uniceub.br/bitstream/235/3636/3/Monografia>>. Acesso em 22 de outubro de 2019.

MORÓN, C.; FERRÁNDEZ, D.; SAIZ, P.; VEGA, G.; DÍAZ, J. **New Prototype of Photovoltaic Solar Tracker Based on Arduino**. Energies, Vol.10, 2017.

MOUSAZADEH, H.; KEYHANI, A.; JAVADI, A.; MOBLI, H. ABRINIA, K.; SHARIFI, A. **A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, pág.1800–1818, 2009.

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.

ORTIZ, F. H. V.; ALVEZ, V. C. G.; HOLDEFER, A. E. MEDEIROS, A. M. M. **Desenvolvimento De Sistema Automático De Rastreamento Solar Para Painéis Fotovoltaicos**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, 2018.

PISANTI, C. **Design and energetic evaluation of a mobile photovoltaic roof for cars**. Energy Procedia, Vol.81, pág.182-192, 2015.

PINHO, J. T.; GALDINO, M.A. **Manual De Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPTEL-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 14 de outubro de 2018.

REZENDE, J. O.; GUIMARÃES JÚNIOR, S. C. **Determinação De Processos Para Levantamento Prático Das Curvas Características De Painéis Fotovoltaicos**. Conferência

de Estudos em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2012. 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.

RICHARDSON, D. B. **Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration**. Sustainable Energy Reviews, Vol.19, pág. 247–254, 2013.

SHAZIB UDDIN, MD.; MANDAL, S.; HASAN, M.; MOURSHED, M. **Design, Construction and Performance Test of a Solar Powered Prototype Vehicle**. International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering, Rajshahi, Bangladesh, 2015.

SIDEK, M.; HASAN, W.; KADIR, M.; SHAFIE, S.; RADZI, M.; AHMAD, S.; MARHABAN, M. **GPS Based Portable Dual-Axis Solar Tracking System Using Astronomical Equation**. Thesis. Universiti Putra Malaysia, 2014.

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.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística**. 11ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

VITÓRIO, J.; ALVES, L.; CAMPOS, L.; FARIA, R.; CALVO, V. **Desenvolvimento do Protótipo de um Carro Fotovoltaico**. Trabalho Acadêmico Integrador (Relatório). Universidade Federal de Minas Gerais, Arcos, Minas Gerais, 2017.

VUOLO, J.H. **Fundamentos da Teoria de Erros**. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1998.

ZHAN, T. S.; LIN, LIN, W. M.; TSAI, M.; WANG, G. **Design and Implementation of the Dual-axis Solar Tracking System**. In Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), pág. 276-277, 2013.

## APÊNDICE A – Programação No Software R - Significância Do Teste De Performance Elétrica.

```

> Psm
[1] 2.69 2.76 2.81 2.85 2.86 2.99 3.24 3.39 3.53 3.56 3.36 3.32 3.28 3.08 3.07 3.05 2.97
> Psf
[1] 1.91 2.24 2.41 2.56 2.62 2.68 2.97 3.10 3.29 3.38 3.07 3.01 2.94 2.82 2.34 2.29 1.74
> Pnm
[1] 2.29 2.16 2.64 2.81 3.03 3.14 3.14 3.23 2.93 2.96 2.12 1.99 2.40 2.53 2.24 2.40 1.25
> Pnf
[1] 1.87 1.64 1.69 2.39 2.88 2.99 3.09 3.20 2.93 2.83 2.08 1.91 1.71 2.16 1.83 2.13 1.13
> shapiro.test(Psm)

      shapiro-wilk normality test

data:  Psm
W = 0.95539, p-value = 0.547
> shapiro.test(Psf)

      shapiro-wilk normality test

data:  Psf
W = 0.96698, p-value = 0.7637
> shapiro.test(Pnm)

      shapiro-wilk normality test

data:  Pnm
W = 0.9348, p-value = 0.2616
> shapiro.test(Pnf)

      shapiro-wilk normality test

data:  Pnf
W = 0.93024, p-value = 0.2197

> t.test(Psm,Psf)

      welch Two Sample t-test

data:  Psm and Psf
t = 3.3415, df = 25.618, p-value = 0.002565
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.1682301 0.7070640
sample estimates:
mean of x mean of y
 3.106471  2.668824
> t.test(Pnm,Pnf)

      welch Two Sample t-test

data:  Pnm and Pnf
t = 1.443, df = 31.11, p-value = 0.159
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
-0.1166679 0.6813738
sample estimates:
mean of x mean of y
 2.544706  2.262353

```

## APÊNDICE B – Programação No Software R - Significância Do Teste Do Modelo.

```

> vm
[1] 0.59 0.77 0.69 0.74 0.64 0.86 0.80 0.81 0.90 0.84 0.90 0.86 0.79 0.83 0.50 0.69 0.87 0.72 0.96
0.75 0.93 0.88 1.11 0.98 1.00 1.05 0.94 1.00 1.03 1.01 0.78
[32] 0.67 0.63 0.72 0.78 0.95 0.90 0.96 0.97 0.89
> vf
[1] 0.720 0.380 0.650 0.620 0.400 0.690 0.740 0.750 0.720 0.710 0.640 0.610 0.700 0.690 0.640 0.590
0.530 0.460 0.510 0.696 0.670 0.660 0.660 0.660 0.590 0.450
[27] 0.580 0.600 0.470 0.660 0.870 0.890 0.900 0.860 0.960 0.620 0.610 0.620 0.670 0.830
> shapiro.test(vm)

      shapiro-wilk normality test

data:  vm
W = 0.98536, p-value = 0.875
> shapiro.test(vf)

      shapiro-wilk normality test

data:  vf
W = 0.96504, p-value = 0.248
> t.test(vm,vf,alternative="two.sided",conf.level=0.95,var.equal=FALSE, paired=FALSE)

      Welch Two Sample t-test

data:  vm and vf
t = 6.1356, df = 77.828, p-value = 3.311e-08
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.1252069 0.2454931
sample estimates:
mean of x mean of y
 0.84225  0.65690

```

## ANEXO A – Programação do rastreador solar/Arduino.

```

int topleft;
int topright;
int downleft;
int downright;
int waittime =1  ;

void setup() {
  pinMode(9, OUTPUT);
  pinMode(10, OUTPUT);
  TCCR1A = 0;
  TCCR1A = (1 << COM1A1) | (1 << COM1B1) | (1 << WGM11);
  TCCR1B = 0;
  TCCR1B = (1 << WGM13) | (1 << WGM12) | (1 << CS11);
  ICR1 = 40000;
  OCR1A = 3000;
  OCR1B = 3600;
}

void loop() {
  topleft = analogRead(A1);
  topright = analogRead(A0);
  downleft = analogRead(A3);
  downright = analogRead(A2);

  if (topleft > topright) {
    OCR1A = OCR1A + 1;
    delay(waittime);
  }
  if (downleft > downright) {
    OCR1A = OCR1A + 1;
    delay(waittime);
  }
  if (topleft < topright) {
    OCR1A = OCR1A - 1;
    delay(waittime);
  }
  if (downleft < downright) {
    OCR1A = OCR1A - 1;
    delay(waittime);
  }
}

```

```
if (OCR1A > 4000) {  
  OCR1A = 4000;  
}  
if (OCR1A < 2000) {  
  OCR1A = 2000;  
}  
if (topleft > downleft) {  
  OCR1B = OCR1B - 1;  
  delay(waittime);  
}  
if (topright > downright) {  
  OCR1B = OCR1B - 1;  
  delay(waittime);  
}  
if (topleft < downleft) {  
  OCR1B = OCR1B + 1;  
  delay(waittime);  
}  
if (topright < downright) {  
  OCR1B = OCR1B + 1;  
  delay(waittime);  
}  
if (OCR1B > 4200) {  
  OCR1B = 4200;  
}  
if (OCR1B < 3000) {  
  OCR1B = 3000;  
}  
}
```