



INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE



**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e  
Automação de Processos de Mineração (PROFICAM)  
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)  
Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)**

**Dissertação**

**PROJETO DE UNIDADE DE ALIMENTAÇÃO VIA PAINEL SOLAR  
PARA UM VEÍCULO ELÉTRICO DE INSPEÇÃO DE TRINCAS EM  
DORMENTES DE AÇO DA ESTRADA DE FERRO VITÓRIA-MINAS**

**Raphael Augusto Dos Santos Ribeiro**

**Ouro Preto  
Minas Gerais, Brasil**

**2022**

**Raphael Augusto Dos Santos Ribeiro**

**PROJETO DE UNIDADE DE ALIMENTAÇÃO VIA PAINEL SOLAR  
PARA UM VEÍCULO ELÉTRICO DE INSPEÇÃO DE TRINCAS EM  
DORMENTES DE AÇO DA ESTRADA DE FERRO VITÓRIA-MINAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Agnaldo José da Rocha Reis (UFOP/Ouro Preto), D.Sc.

Coorientador: Prof. Glauco Ferreira Gazel Yared (UFOP/João Monlevade), D.Sc.

Ouro Preto

2022

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R484p Ribeiro, Raphael Augusto dos Santos.

Projeto de unidade de alimentação via painel solar para um veículo elétrico de inspeção de trincas em dormentes de aço da estrada de ferro Vitória-Minas. [manuscrito] / Raphael Augusto dos Santos Ribeiro. - 2022. 80 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis.

Coorientador: Prof. Dr. Glauco Ferreira Gazel Yared.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Mineraiis.

1. Energia - Fontes alternativas - Eficiência Energética. 2. Coletores solares. 3. Ferrovias - Dormentes de Aço. 4. Deformações (Mecânica). 5. Veículos elétricos. 6. Dormente - Geometria Superficial. I. Reis, Agnaldo José da Rocha. II. Yared, Glauco Ferreira Gazel. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5:622.2

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
PROGR. POS GRAD. PROF. INST. CONT. E AUT.  
PROCESSOS DE MIN.



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Raphael Augusto dos Santos Ribeiro**

**Projeto de unidade de alimentação via painel solar para um veículo elétrico de inspeção de trincas em dormentes de aço da estrada de ferro Vitória-Minas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM), Convênio Universidade Federal de Ouro Preto/Associação Instituto Tecnológico Vale - UFOP/ITV, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação na área de concentração em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Aprovada em 01 de julho de 2022

**Membros da banca**

Doutor - Agnaldo José da Rocha Reis - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Doutor - Glauco Ferreira Gazel Yared - Coorientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Doutor - Paulo Marcos de Barros Monteiro - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
Doutor - Paulo Raimundo Pinto - Instituto Federal de Minas Gerais/Ouro Preto

Agnaldo José da Rocha Reis, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 23/09/2022



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Nazário Coelho, COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INST. CONTROLE AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DE MINERAÇÃO**, em 29/09/2022, às 14:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0405490** e o código CRC **9F507EBF**.

*Dedico esta conquista deste trabalho, primeiramente a Deus e Nossa Senhora Aparecida, que me protegeram e me trouxeram o discernimento e força necessários para conclusão desta trajetória e a minha mãe, meu pai, meu irmão e Xica, por todo apoio familiar e toda ajuda para que eu realizasse este sonho.*

## **Agradecimentos**

Agradeço, primeiramente, a Deus e a Nossa Senhora Aparecida pela oportunidade de cursar este Mestrado Profissional e por toda proteção ao longo do caminho. Agradeço à minha mãe, Zilda; meu pai, Januário; meu irmão, Matheus e à Xica pela estrutura familiar que me manteve preparado para alcançar meu objetivo. Agradeço a minhas amigas, aos meus amigos e aos meus colegas de turma. Agradeço a todos os professores e profissionais do Instituto Tecnológico da Vale por todos os aprendizados que me tornam um profissional mais completo a cada dia e um cientista mais entusiasmado com a educação, como um todo. Em especial, agradeço aos professores Agnaldo e Glauco por toda a evolução a qual me orientaram. A todos os profissionais da saúde que trabalharam incessantemente nestes anos de pandemia. Finalmente, agradeço à Escola de Minas e à UFOP, pelo ensino público de qualidade. E viva a Escola de Minas!

**Este projeto de pesquisa foi financiado pela Vale S.A. e se encontra vinculado à Cátedra Under Rail.**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001; do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e da Vale SA.

*"Todas as crianças são artistas. O problema é como permanecer um artista quando se cresce."*

*(Pablo Picasso)*

## **Resumo**

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

### **PROJETO DE UNIDADE DE ALIMENTAÇÃO VIA PAINEL SOLAR PARA UM VEÍCULO ELÉTRICO DE INSPEÇÃO DE TRINCAS EM DORMENTES DE AÇO DA ESTRADA DE FERRO VITÓRIA-MINAS**

Raphael Augusto dos Santos Ribeiro

Julho, 2022

Orientadores: Prof. Agnaldo José da Rocha Reis (UFOP/Ouro Preto), D.Sc.

Prof. Glauco Ferreira Gazel Yared (UFOP/João Monlevade), D.Sc.

O aumento crescente da carga transportada por eixo na Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM) impacta diretamente os elementos que compõem a infraestrutura e a superestrutura ferroviária. Assim, com o intuito de se garantir a confiabilidade e a segurança do transporte ferroviário, torna-se cada vez mais importante o monitoramento das condições da via permanente e a realização da manutenção preventiva. Para tanto, encontra-se em desenvolvimento um veículo autônomo, no escopo do Projeto Vale/UFOP Número de Contrato CV.19.000021.0, capaz de se deslocar sobre a ferrovia, efetuando a leitura da geometria superficial de cada dormente de aço e realizando o diagnóstico da presença de trincados e/ou de fraturados. Esse veículo é alimentado com uma bateria de 12V e deverá contar com uma fonte de energia auxiliar. Nesse contexto é que se insere este trabalho, cujo tema central é o desenvolvimento de uma estratégia de alimentação híbrida para o veículo em questão utilizando-se, além da sua bateria, um painel solar. Essa unidade híbrida será a responsável pelo acionamento de todos os sistemas eletro-eletrônicos constituintes do veículo (e.g., motor, sensores, sistema de controle etc.). A presença desse módulo híbrido garantirá uma maior autonomia ao veículo, uma vez que ele poderá realizar inspeções por um tempo maior sem haver a necessidade de interrupções para substituição ou recarga de bateria.



**Palavras-chave:** Eficiência Energética, Pannel Solar, Dormentes de Aço, Detecção de anomalias, Veículo Autônomo, Geometria Superficial.

**Macrotema:** Logística; **Linha de Pesquisa:** Tecnologias da Informação, Comunicação e Automação Industrial; **Tema:** Eficiência Energética; **Área Relacionada da Vale:** Ferrovia.

## **Abstract**

Abstract of Dissertation presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

### DESIGN OF A SOLAR PANEL POWER UNIT FOR A CRACK INSPECTION ELECTRIC VEHICLE OF THE VITÓRIA-MINAS RAILROAD'S STEEL SLEEPERS

Raphael Augusto dos Santos Ribeiro

July, 2022

Advisors: Prof. Agnaldo José da Rocha Reis (UFOP/Ouro Preto), D.Sc.

Prof. Glauco Ferreira Gazel Yared (UFOP/João Monlevade), D.Sc.

The growing increase in cargo transported by axle on the Vitória-Minas Railroad (EFVM) directly impacts the elements that make up its infrastructure and superstructure. Thus, in order to guarantee the reliability and safety of rail transportation, it is becoming increasingly important to monitor the conditions of the permanent track and carry out preventive maintenance. Therefore, an autonomous vehicle, which is capable of moving over the railroad and reading the surface geometry of each steel sleeper and diagnosing the presence of cracks and/or fractures on it, is under development via Vale/UFOP Project, Contract Number CV.19.000021.0. This autonomous vehicle is powered by a 12V battery and must have an auxiliary power source. It is in this context that this work is inserted, whose central theme is the development of a hybrid power strategy for the vehicle aforementioned using, in addition to its battery, a solar panel. This hybrid unit will be responsible for driving all the electro-electronic systems that make up the vehicle (e.g., engine, sensors, control systems etc.). The presence of this hybrid module will guarantee greater autonomy to the vehicle, since it will be able to carry out inspections for a longer time without the need for interruptions for replacing or recharging the battery.

**Keywords:** Energy Efficiency, Solar Panel, Steel Sleepers, Anomaly Detection, Autonomous Vehicle, Surface Geometry.

**Macrotheme:** Logistics; **Research Line:** Information Technologies, Communication and Industrial Automation; **Theme:** Energy Efficiency; **Vale's Related Area:** Railroad.

## Lista de Figuras

Figura 1: Configuração de um módulo fotovoltaico .....	20
Figura 2: Exemplificação de PVs .....	21
Figura 3: Diagrama de Blocos do Sistema Fotovoltaico com Controlador MPPT .....	23
Figura 4: Gráfico da comparação da energia entre um sistema fixo e um sistema de dois eixos .....	25
Figura 5: Seguidor de dois eixos .....	25
Figura 6: Mini Célula Solar .....	32
Figura 7: Modelo de Protótipo de Seguidor Solar .....	32
Figura 8: Estrutura MDF do Seguidor com Montagem.....	34
Figura 9: Servomotor Lateral .....	35
Figura 10: Servomotor Base Circular .....	35
Figura 11: Descrição Arduino MEGA 2560.....	35
Figura 12: LDRs do Protótipo .....	36
Figura 13: Mini Célula Solar do Protótipo .....	36
Figura 14: Simulação Seguidor Solar TinkerCAD.....	37
Figura 15: Simulação Seguidor Solar com Alteração da Incidência Solar.....	37
Figura 16: Sensor de Corrente ACS712.....	38
Figura 17: Sensor de Tensão .....	39
Figura 18: Módulo Real-Time Clock .....	39
Figura 19: Bateria Recarregável CR123a 3.7V .....	40
Figura 20: Carregador Solar CN3791 MPPT .....	40
Figura 21: Carregador Solar CN3065.....	40
Figura 22: Conversor Buck-Boost DC-DC .....	40
Figura 23: Fixação do Protótipo .....	45

Figura 24: Demonstração da Angulação aplicada no Painel Convencional.....	46
Figura 25: Demonstração do Circuito de Descarga das Baterias .....	47
Figura 26: Comparativo de Eficiência Energética Geral.....	59
Figura 27: Comparativo de Tensões (V) do Teste 3, Cenário 1, de Sul a Norte.....	66
Figura 28: Comparativo de Tensões (V) do Teste 10, Cenário 2, de Oeste a Leste.....	67
Figura 29: Comparativo de Tensões (V) do Teste 15, Cenário 1, de Oeste a Leste.....	67
Figura 30: Comparativo de Tensões (V) do Teste 21, Cenário 2, de Sul a Norte.....	68
Figura 31: Comparativo de Tensões (V) do Teste 29, Cenário 2, de Sul a Norte.....	69

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dados dos Testes Preliminares.....	42
Tabela 2 - Tabela de Médias do Dia 1 .....	48
Tabela 3 - Tabela de Médias do Dia 2.....	49
Tabela 4 - Tabela de Médias do Dia 3.....	50
Tabela 5 - Tabela de Médias do Dia 4.....	51
Tabela 6 - Tabela de Médias do Dia 5.....	52
Tabela 7 - Testes Estatísticos.....	54
Tabela 8 - Testes Estatísticos com Ganho Percentual .....	56
Tabela 9 - Médias das Potências Gerais em Relação aos Horários e Sentidos – Painel Convencional .....	57
Tabela 10 - Médias das Potências Gerais em Relação aos Horários e Sentidos – Seguidor Solar.....	58
Tabela 11 - Tabela de Médias da Segunda Bateria de Testes .....	61
Tabela 12 - Testes Estatísticos e Análise Percentual da Segunda Bateria de Testes.....	64

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1. Motivação .....	16
1.2. Objetivos.....	17
1.2.1 Objetivo Geral .....	17
1.2.2 Objetivos Específicos .....	17
1.3. Organização do Texto .....	17
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
2.1. Geração de Energia Elétrica: Energia Solar .....	18
2.2 Sistemas Fotovoltaicos .....	19
2.2.1 O Efeito Fotovoltaico .....	19
2.2.1.1 Células fotovoltaicas .....	19
2.2.1.2 Módulos Fotovoltaicos .....	20
2.2.1.3 Controlador de carga .....	22
2.2.1.3.1 Controlador de Carga MPPT .....	22
2.3 Seguidores Solares .....	23
2.4 Veículos Elétricos .....	26
2.4.1 Baterias automotivas .....	27
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
3.1. Especificações do Veículo Autônomo .....	28
3.1.1 Especificações da Bateria do Veículo .....	28
3.1.2 Exemplo de especificações de um módulo fotovoltaico .....	29
3.1.3 Exemplo de especificações referentes a um controlador de carga MPPT .....	30
3.2. Protótipo do Sistema.....	31
3.2.1 Montagem do Protótipo .....	32

3.2.1.1	Confecção do Seguidor Solar de Dois Eixos .....	33
3.2.1.2	Estratégias de aproveitamento máximo da irradiância.....	38
3.2.1.2	Integração com a bateria.....	39
3.2.2	Testes .....	41
3.2.2.1	Testes Preliminares .....	41
3.2.2.2	Primeira Bateria de Testes Oficiais (Sem MPPT).....	43
3.2.2.2.1	Melhorias de Montagem.....	44
3.2.2.2.2	Análises da Coleta dos Dados .....	47
3.2.2.2.2.1	Análise das Médias .....	47
3.2.2.2.2.2	Testes Estatísticos.....	53
3.2.2.2.2.3	Análise Percentual .....	55
3.2.2.2.2.4	Comparativo de Eficiência Energética Geral .....	57
3.2.2.3	Segunda Bateria de Testes Oficiais (Com MPPT).....	59
3.2.2.3.1	Análises da Coleta dos Dados.....	59
3.2.2.3.1.1	Análise das Médias .....	60
3.2.2.3.1.2	Testes Estatísticos e Análise Percentual .....	63
3.2.2.3.1.3	Influência do Carregador MPPT.....	66
<b>4.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>70</b>
4.1	Contribuições .....	70
4.2.	Produtos Gerados e Produtos a Serem Gerados.....	71
4.3	Trabalhos Futuros .....	72
4.3.1	Sistema de Previsão de Geração Energética .....	72
4.3.2	Simulação Estacionária pelo PVSyst.....	72
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>73</b>
	<b>Anexo I – Pseudo-código Utilizado .....</b>	<b>76</b>



# **1. INTRODUÇÃO**

A utilização de formas de energia renováveis vem sendo, a cada ano, mais empregada na aquisição de energia elétrica, a fim de atingir a sustentabilidade de sistemas geradores de eletricidade. Dentre elas, a área referente à energia solar vem obtendo grandes avanços em vários ramos da tecnologia, seja no uso residencial, comercial ou industrial, sendo este último o objeto de estudo neste projeto. Tal utilização será trabalhada na busca pela eficiência energética de um veículo autônomo responsável pelo diagnóstico de trincas em dormentes de aço da Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM) a partir de informações extraídas da geometria superficial.

## **1.1. Motivação**

Dada a proposta de obter autonomia de um veículo cuja funcionalidade se baseia na aquisição de dados para análise e posterior diagnóstico referente à presença ou não de trincas em trechos da ferrovia, surge a necessidade de que o veículo percorra o trecho em questão de forma sustentável, uma vez que o uso de combustíveis fósseis, comumente empregado em veículos automotores, promove uma degradação ambiental significativa, além da sua menor viabilidade econômica se comparado à geração de energia limpa.

Sendo assim, a implementação de um sistema fotovoltaico off-grid, ou seja, independente do fornecimento de energia de concessionárias de eletricidade, oferece uma alternativa de subsistência energética de um veículo automotor elétrico de aplicação industrial. A alimentação de suas baterias e dos demais componentes eletro-eletrônicos do veículo é garantida, tornando a aplicação de seu trabalho estável do ponto de vista energético. O projeto obteve a construção, em etapas anteriores, da parte referente a mobilidade e aquisição de dados do veículo, fomentando o foco em sua sustentabilidade nesta etapa.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Propor uma alternativa de eficiência energética com viabilidade econômica para alimentação via painel solar de um veículo autônomo utilizado na inspeção de trincas em dormentes de aço da Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM) com o desenvolvimento e aplicação de estratégias que visam atingir um máximo aproveitamento da energia solar gerada para gasto mínimo da carga da bateria utilizada para seu armazenamento.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Em busca de se alcançar o objetivo geral, tem-se como objetivos específicos os listados a seguir:

- Desenvolver o planejamento de um sistema energético veicular de energia solar;
- Fazer uma análise comparativa entre o uso de painel fixo e o com seguidor solar com o intuito de oferecer um máximo aproveitamento da incidência solar ao longo de todo o trecho;
- Desenvolver um protótipo de aplicação do sistema idealizado e avaliar o seu desempenho.

## **1.3. Organização do Texto**

Este trabalho está dividido em mais 3 capítulos, além desta introdução. A revisão da literatura na área de interesse do Projeto é apresentada no Capítulo 2. Já no capítulo 3, os materiais e métodos a serem empregados são discutidos. As Considerações Finais e os Próximos Passos da Pesquisa são assuntos do Capítulo 4, além das sugestões para trabalhos futuros. Ao final, o Anexo I é apresentado, com o Pseudo-Código do Projeto desenvolvido.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. Geração de Energia Elétrica: Energia Solar**

Existem várias formas de obtenção de energia elétrica. Trata-se de uma forma de energia secundária, ou seja, necessita da transformação de alguma forma de energia proveniente da natureza, tendo esta manipulação associada a custos e impactos ambientais. As formas de conversão de energia elétrica comumente empregadas são a partir de hidrelétricas, energia eólica, energia nuclear, termelétrica, cogeração (por gaseificação ou vapor d'água) e energia solar, sendo esta última o foco deste projeto.

O uso de radiação solar pode ser relacionado de forma direta à origem da energia térmica, provocando aquecimento de ambientes e fluidos e/ou geração de potência mecânica ou elétrica. Através do efeito fotovoltaico e termoelétrico, também é capaz de se produzir energia elétrica diretamente.

Através dos efeitos da radiação, ou seja, calor e luz, em semicondutores, é possível converter-se, diretamente, a energia solar em energia elétrica. Com este fim, destacam-se os efeitos termoelétrico e fotovoltaico (Fadigas, 2014). No primeiro, em condições específicas, surge uma diferença de potencial na junção de dois metais, ao passo que no segundo os fótons da luz visível reagem com as células solares e geram energia elétrica.

As formas de manipulação da energia solar mais usadas são o aquecimento de água e a geração fotovoltaica de eletricidade. Porém, para a viabilidade de ambos processos se faz necessária uma análise climática dos locais em questão, de modo a atender melhor necessidades pontuais.

No Brasil, com exceção da região Nordeste onde é possível o encontro de usinas solares e parques eólicos, a utilização de sistemas fotovoltaicos ainda não é amplamente empregada, o que torna a geração de energias renováveis ainda pouco presente na matriz energética brasileira ao longo da última década (Confessor, 2014).

## **2.2 Sistemas Fotovoltaicos**

Sistemas fotovoltaicos são aqueles nos quais acontece a conversão da energia solar em elétrica. Ele se dá através da junção de determinados componentes elétricos, condições climáticas e cargas. São divididos em dois tipos de sistema:

- **Sistemas Fotovoltaicos Autônomos:** Conhecidos também como Sistemas Fotovoltaicos Off-Grid, operam sem a necessidade de conexão à rede elétrica oferecida pela concessionária. Eles têm como função alimentar diretamente as cargas consumidoras de energia elétrica através somente do recurso solar.
- **Sistemas Fotovoltaicos Conectados:** Conhecidos também como Sistemas Fotovoltaicos On-Grid, operam com vínculo à conexão à rede elétrica oferecida pela concessionária. Desta forma, destinam o período de incidência solar para fornecimento de potência à rede, representando uma fonte complementar de energia ao sistema elétrico ao qual está conectado.

### **2.2.1 O Efeito Fotovoltaico**

A nomenclatura “efeito fotovoltaico” dá-se ao fenômeno físico em que ocorre a geração de tensão ou corrente elétrica a partir da incidência de luz. Existe uma considerável diferença nos conceitos de efeito fotovoltaico e efeito fotoelétrico, embora sejam comumente associados. No primeiro, dentro do material que recebe a incidência de luz, os elétrons que são gerados são compartilhados das bandas de valência para as bandas de condução, o que dá origem, por dois eletrodos, à diferença de potencial (tensão elétrica). Já no segundo, ocorre a aplicação de uma dada exposição à radiação onde, quando suficiente, faz com que elétrons sejam ejetados da superfície do material.

#### **2.2.1.1 Células fotovoltaicas**

Na natureza encontramos determinados materiais cuja nomenclatura é dada por semicondutores. Estes materiais têm como característica o fato de terem uma banda de valência preenchida em sua totalidade por elétrons e uma banda de condução que, à baixa temperatura, está completamente vazia. A separação entre as bandas se dá pela ordem de 1 eLetronvolt,

fazendo com que tenham a característica de maior condutividade na presença de temperaturas mais elevadas, uma vez que a excitação térmica provoca movimentação daqueles elétrons que se localizam na banda de valência para a banda de condução. Os fótons, por sua vez, excitam elétrons que estão na banda de condução, o que representa o principal fator de funcionamento das células fotovoltaicas, mas não o único.

### 2.2.1.2 Módulos Fotovoltaicos

A tensão presente nos terminais de uma célula fotovoltaica é baixa (tipicamente 0,4V), o que faz com que sua corrente também seja muito pequena, na ordem de miliamperes. Com base nisso, faz-se necessária a ligação em série e/ou paralelo para provocar um aumento de potência e, conseqüentemente, alimentar determinada carga. A essa configuração, ilustrada na Figura 1, dá-se o nome de módulo fotovoltaico (PV) e sua aparência é exemplificada na Figura 2. As Equações 1 e 2 representam, respectivamente, a 1ª e 2ª Leis de Kirchhoff para circuitos elétricos.

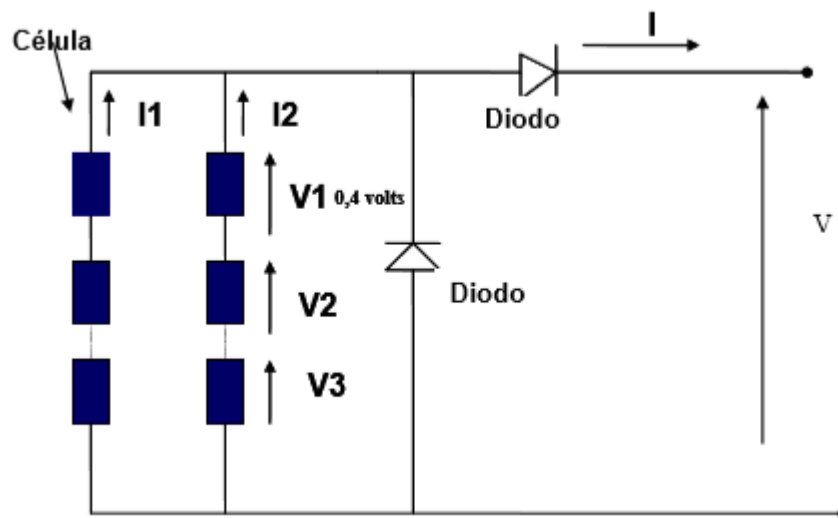


Figura 1: Configuração de um módulo fotovoltaico

Fonte: Fadigas, 2014

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (1)$$

$$V = V1 + V2 + V3 + \dots + Vn \quad (2)$$

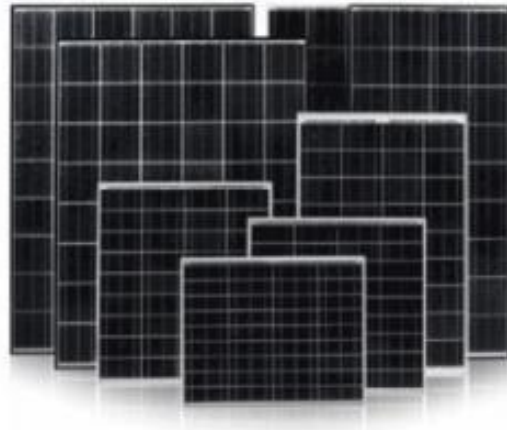


Figura 2: Exemplificação de PVs

Fonte: Kyocera, 2014

Uma informação de extrema importância para avaliar e dimensionar determinado sistema fotovoltaico é a eficiência do módulo. A instituição responsável pela avaliação e certificação dos módulos é o INMETRO, em todo território nacional, fornecendo, aos mesmos, o selo do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL, confirmando sua eficiência. Assim, podemos definir a eficiência da conversão feita pelo módulo pela seguinte expressão:

$$\eta = \text{Potência Elétrica gerada pelo módulo} / \text{Potência presente na incidência solar}$$

A partir da forma de configuração das células (série, paralelo ou em série-paralelo) definimos a potência do módulo, que tem sua parte frontal com revestimento em resina ou vidro temperado de alta transparência, altamente resistente a intempéries, poeira e umidade. O módulo gera uma corrente contínua (CC), podendo alimentar de forma direta equipamentos alimentados com esse tipo de energia e promover o carregamento de baterias, e é composto por 28 a 40 células de silício cristalino, tipicamente.

À associação de módulos, conexões, diodos de proteção e estruturas de suporte dá-se o nome de arranjo fotovoltaico. De modo a tê-lo visando organização, as estruturas de suporte permitem interligação dos módulos de uma forma simples e comumente são feitas de madeira, aço ou alumínio.

A instalação do painel especificado acima no veículo autônomo em desenvolvimento exigirá a construção de uma estrutura específica para suportá-lo, pelo seu peso e tamanho. Desse modo, a intenção neste trabalho é a de desenvolver um sistema de geração de energia o mais leve possível, utilizando de estratégias de máximo aproveitamento da incidência solar, de forma a ser utilizado um painel de menor potência e, conseqüentemente, menor peso.

### **2.2.1.3 Controlador de carga**

Para sistemas que fazem uso de bateria, faz-se necessária a adequação desse componente, que é responsável por promover desligamento da carga quando a bateria chega em nível mínimo de descarga especificado. Analogamente, é responsável também por promover desconexão do arranjo fotovoltaico assim que a bateria assume seu nível máximo de carregamento permitido. Além disso, a presença do controlador de carga de, no mínimo, 10% da capacidade da bateria garante o seu melhor aproveitamento.

#### **2.2.1.3.1 Controlador de Carga MPPT**

Uma vez que existe a dependência das condições atmosféricas para que o painel fotovoltaico tenha uma geração de potência confiável para determinada eficiência objetiva do sistema, o Controlador *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) surge como uma alternativa de melhoria de desempenho do protótipo.

Apesar de ser mais caro que um controlador PWM, o MPPT garante um maior fornecimento de corrente à bateria, uma vez que trabalha na potência máxima do PV, o que vai de encontro a um dos objetivos deste trabalho: máximo aproveitamento da energia solar gerada. Ele é projetado para detectar possíveis variações de incidência solar, mantendo o ponto operacional do sistema no ponto de máxima potência. Havendo correspondência entre a fonte e a impedância da carga, há transferência da potência.

Uma possível melhoria da atuação do MPPT pode ser observada no diagrama de blocos do sistema na Figura 3, onde há o fornecimento de corrente contínua proveniente do painel fotovoltaico ao controlador MPPT, a qual, multiplicada pela tensão do painel fotovoltaico presente na entrada do controlador MPPT, fornece os valores de potência que possibilitarão ao controlador determinar o ponto em que ela é máxima.

Desse modo, o conversor DC-DC aumenta a corrente fornecida pelo painel e alimenta a carga DC com uma potência maior que a melhor gerada pelo PV.

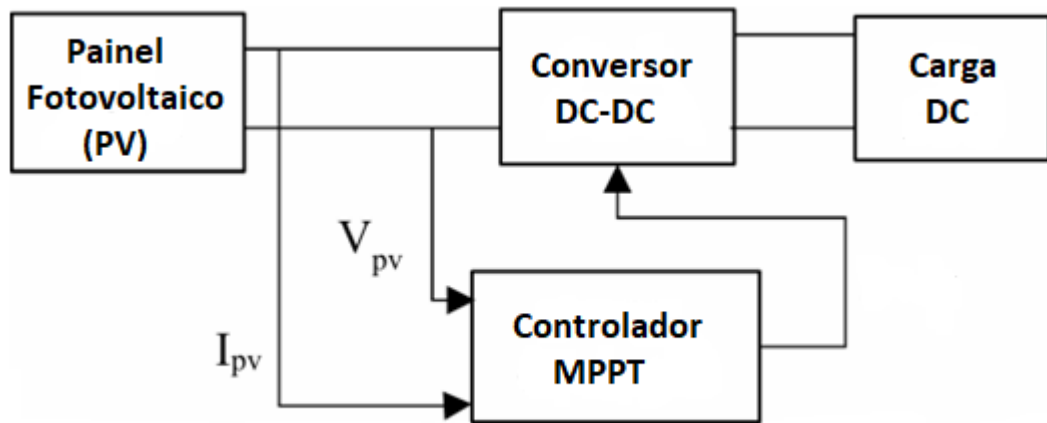


Figura 3: Diagrama de Blocos do Sistema Fotovoltaico com Controlador MPPT

Fonte: Adaptado de Singh, 2017

### 2.3 Seguidores Solares

Segundo Cortez (2013), seguidores solares são dispositivos mecânicos cuja função é fazer com que os PVs se posicionem de modo a captar o máximo possível de radiação solar. Normalmente, seu custo representa cerca de 20% do preço total de instalação de um sistema fotovoltaico, podendo, porém, aumentar em até 40% o aproveitamento do mesmo e com baixo custo de manutenção. Um seguidor ativo é aquele que utiliza como referência sensores ou algoritmos cronológicos para melhor posicionar o painel para recebimento de energia.



Whavale et al. (2018) relatam que com o uso de dispositivos de rastreamento solar, a geração de energia (solar) pode aumentar a energia coletada entre 10% e 100% dependendo das condições geográficas. Eles estudaram dois tipos de sistemas de rastreamento solar: sistemas de rastreamento de eixo único e de eixo duplo.

Já Amara et al. (2018) apresentaram o desenvolvimento de uma técnica inteligente de Sistema de Inferência Adaptativo-Neuro-Fuzzy (ANFIS) baseado no algoritmo de Rastreamento de Ponto de Potência Máxima (ANFIS-MPPT), com controlador PI, para aumentar o desempenho do sistema de painel fotovoltaico baseado nas alterações das circunstâncias atmosféricas.

Neste trabalho, o seguidor estudado será o de dois eixos, que possui um poste vertical responsável pelo movimento a Leste e Oeste e um horizontal responsável pelo movimento Norte e Sul. Isso se deve ao fato de possibilitar uma maior abrangência dos raios solares incidentes na face do módulo que o de eixo único por se movimentar em um grau de liberdade a mais, podendo ter um aproveitamento muito maior de energia em relação aos painéis fixos em horários de pico de irradiância solar e, principalmente, em horários de pouca luminosidade.

A seguir, a Figura 4 ilustra de forma gráfica os motivos pelos quais um sistema com a instalação de um seguidor solar de dois eixos leva vantagem em relação aos sistemas fixos convencionais. A linha verde representa o desempenho do seguidor solar de dois eixos ao longo do dia, enquanto a azul representa um sistema fixo.

É possível perceber que, ao contrário do sistema fixo, o com seguidor de dois eixos tem um ótimo desempenho em horários de pouca irradiância solar pela manhã e ao fim da tarde e um maior pico de geração energética, sendo mais eficiente ao longo de todo o período de insolação.

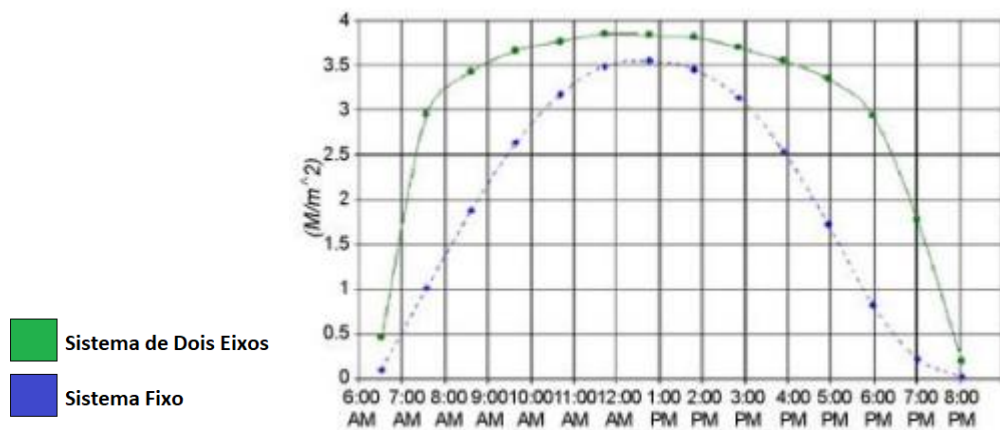


Figura 4: Gráfico da comparação da energia entre um sistema fixo e um sistema de dois eixos

Fonte: Cortez, 2013

Observa-se na Figura 5, a seguir, os movimentos realizados pelo seguidor de dois eixos, com os quais é possível uma abrangência ótima da incidência solar no painel.



Figura 5: Seguidor de dois eixos

Fonte: Martins, 2016

Para montagem do seguidor solar de dois eixos, são necessários dois motores, componentes eletrônicos, sensores e um microcontrolador. Cada motor é responsável pela movimentação do painel fotovoltaico em uma das direções: horizontal ou vertical. Dessa forma,

a área da superfície do painel consegue captar vários dos raios solares que seriam inacessíveis com o painel fixo, o que gera um aumento da produtividade da irradiância global.

Os motores são comandados pelo microcontrolador, que recebe dos sensores os dados referentes à luminosidade e controla a posição para que o painel receba maior luminosidade. Neste trabalho, um protótipo deste sistema será desenvolvido em escalas menores e, posteriormente, de posse dos resultados, será empregado no veículo em prol de sua eficiência energética.

## **2.4 Veículos Elétricos**

Nos últimos anos, a abordagem acerca da utilização de veículos elétricos (EVs) vem crescendo muito, devido à temática de preservação ambiental, uma vez que a emissão de poluentes resultantes do uso de combustíveis fósseis gera diversos problemas relacionados à poluição, sendo o aquecimento global um dos maiores. No entanto, automóveis híbridos e elétricos não são inovações tecnológicas recentes.

Segundo Baran (2011), o início da sua idealização foi em meados do século XIX, com o estudo das baterias. Naquela época, travaram uma grande concorrência com os veículos de combustão interna, mas acabaram sendo superados por eles nessa corrida, sendo pouco enfatizados durante cerca de 80 anos.

Com a chegada da década de 1960, as preocupações relacionadas à preservação ambiental obtiveram uma maior relevância, trazendo novamente os carros de uso de energia limpa ao contexto comercial e industrial. A partir dos anos 1980, o conceito de desenvolvimento sustentável passou a ser amplamente empregado, recebendo incentivos financeiros ao redor do mundo e fomentando, anos depois, a fabricação de híbridos de sucesso pela Toyota, Audi, Honda, dentre outros.

Mesmo com diversos desafios políticos e institucionais, o uso dos veículos elétricos tem ganhado bastante visibilidade em vários países. No Brasil, em caso de um trabalho social em prol de sua utilização elucidando todos os benefícios inerentes a eles, se mostraria uma excelente opção de preservação ambiental, economia e eficiência energética.

### **2.4.1 Baterias automotivas**

Responsáveis pelo armazenamento de energia, as baterias são elementos essenciais dos sistemas fotovoltaicos off-grid. Para este trabalho, sua importância é grande, uma vez que é proveniente dela a energia que alimenta todas as cargas de um veículo cujo desafio é permanecer várias horas sem a necessidade de recarga, trabalhando na ferrovia. Sendo assim, as baterias automotivas surgem como grande solução, sendo as mais comuns de serem empregadas em sistemas fotovoltaicos, as de chumbo-ácido.

As baterias de chumbo-ácido são as mais utilizadas comercialmente no setor automotivo. Isso se deve ao fato de serem mais baratas e mais eficientes que as de níquel-cádmio, segundo tipo de bateria mais empregado, que por sua vez possuem uma maior densidade energética e maior vida útil, além de menor impacto ambiental. Um grande desafio da evolução dos veículos elétricos, bem como sua competitividade no mercado, sempre foi o seu armazenamento de energia (Kulak, 2020).

A partir disso, nos últimos anos vêm surgindo na literatura diversos estudos científicos acerca dos sistemas híbridos de armazenamento de energia (HESS), que dispõe não somente da utilização de baterias como a integração de supercapacitores (SCs) e/ou outras fontes de energia para uma melhoria da eficiência energética do veículo. Tal sistema surge como uma estratégia neste trabalho, buscando um melhor desempenho do projeto da unidade de alimentação proposta para o veículo em desenvolvimento.

## **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Para criação e execução do sistema fotovoltaico off-grid responsável pela eficiência energética do veículo autônomo em desenvolvimento, fez-se necessário um estudo, por meio de simulações e experimentos, que determinará a sua eficácia e viabilidade. De uma maneira geral, um sistema autônomo é composto por painel fotovoltaico, dispositivos de armazenamento de energia, carga e regulador.

A utilização da bateria é comumente escolhida pelo fato de se ter boa disponibilidade de mercado e um custo acessível. No entanto, devido às oscilações climáticas, usar somente painéis fotovoltaicos para carregar a bateria não é indicado, uma vez que o recurso solar não representa constância, ou seja, depende muito das condições atmosféricas, não permitindo a confiabilidade e/ou eficiência necessárias para um armazenamento confiável de energia.

Desse modo, apresenta-se neste capítulo uma proposta de um protótipo que possa atender todas as demandas do veículo autônomo objeto de estudo. Para tal, são apresentadas estratégias para o aproveitamento máximo da incidência solar ao longo de todo o trecho da EFVM, bem como um melhor dimensionamento para o sistema fotovoltaico a ser instalado.

### **3.1. Especificações do Veículo Autônomo**

Nas etapas do projeto que vêm sendo desenvolvidas paralelamente, houve montagem e análise de funcionamento para a aplicação do veículo autônomo, cujas especificações são as seguintes:

- Carro controle: Mini Buggy ou similar;
- Tração e Partida Elétrica;
- Chassis: Em aço tubular;
- Amortecedores hidráulicos;
- Pneus: Off-Road aro 8”;
- Marchas: Frente, Ré e Neutro;
- Dimensões: Comprimento x Largura – 220 cm x 128 cm;
- Distância entre eixos 152 cm;
- Massa: 125 kg;
- Capacidade de Carga: Até 125 kg;
- Sistema de tração mista com redução;
- Velocidade Máxima: 30km/h.

#### **3.1.1 Especificações da Bateria do Veículo**

Dentre os tipos de bateria presentes no mercado, pode-se destacar as automotivas e as tracionárias para esta aplicação. As primeiras são as mais comuns no mercado, dedicadas a

oferecer um grande volume de corrente em um curto período de tempo, tendendo a oferecer fornecimento de energia em até 10% de sua capacidade. Já as segundas, são desenvolvidas com o intuito de ser o combustível para equipamentos elétricos, com capacidade cíclica, resistência e condutividade elétrica muito maiores que a anterior, tendendo a oferecer fornecimento de energia em até 80% de sua capacidade. Por estes motivos, a bateria empregada no veículo é do modelo tracionário, apresentando as seguintes especificações:

- Capacidade: 150Ah;
- Tensão: 12V;
- C20 (Capacidade): 150Ah;
- RC 25 (Reserva de Capacidade): 300 min;
- Dimensões (Comprimento x Largura x Altura): 438 mm x 181 mm x 305 mm;
- Massa: 45kg.

Segundo Ogawa (2011), a nomenclatura C20 é referente à capacidade de fornecimento de corrente pela bateria, em temperatura ambiente, durante 20 horas para todo valor de tensão entre os pólos acima de 10,5V, medido em ampere-hora (Ah). A corrente de descarga é a razão da capacidade pelo tempo de descarga, ou seja, a corrente de descarga da referida bateria é  $150\text{Ah}/20\text{h} = 7,5 \text{ A}$ .

No entanto, só será possível atingir o tempo máximo dado pelas especificações da bateria em caso de um ambiente controlado, ou seja, com uma aplicação que obedeça às condições de temperatura e de descarga específicas. Sendo assim, esse cálculo somente será confiável por meio de experimentos em campo.

### **3.1.2 Exemplo de especificações de um módulo fotovoltaico**

A seguir um exemplo de especificações de um módulo fotovoltaico (disponível no sítio da Neo Solar):

- Potência do Pannel: 30 Wp
- Tolerância:  $\pm 3 \text{ W}$
- Tensão de Máxima Potência ( $V_{mp}$ ): 18,54 V

- Corrente de Máxima Potência (Imp): 1,62 A
- Tensão em Aberto (Voc): 22,68 V
- Corrente de Curto Circuito (Isc): 1,76 A
- Tensão Máxima do Sistema: 1.000 V
- Eficiência Módulo: 12,79 %
- Temperatura Nominal da Célula (TNOC/NOCT):  $45 \pm 2$  °C
- Coeficiente de Temperatura da Potência: -0,39 %/°C
- Coeficiente de Temperatura da Tensão: -0,32 %/°C
- Coeficiente de Temperatura da Corrente: 0,5 %/°C;
- Corrente Máxima do Fusível: 15 A;
- Dimensões do Pannel: 670 x 350 x 25 mm;
- Dimensões do Pannel com embalagem: 700 x 380 x 65 mm;
- Peso do Módulo: 2,6 Kg;
- Peso do Módulo com embalagem: 3,1 Kg;
- Código IP da caixa de proteção: IP 67;
- Número de Células e Tipo: 36 (4x9), Silício Policristalino;
- Vidro, espessura e tipo: Vidro de alta transparência de 32mm com liga de alumínio anodizado;
- Garantia: 12 anos.

### **3.1.3 Exemplo de especificações referentes a um controlador de carga MPPT**

A seguir um exemplo de especificações referentes a um controlador de carga MPPT (disponível no sítio da Minha Casa Solar):

- Tensão nominal: 12V/24V (reconhecimento automático)
- Corrente máxima de carga: 20A
- Tensão solar máxima na entrada: 100Vcc

- Potência máxima solar na entrada em 12V: 260W
- Potência máxima solar na entrada em 24V: 520W
- Comunicação: RS232
- Bitola máxima do cabo elétrico: 8 mm<sup>2</sup>
- Dimensões: 150 x 105,6 x 61,5mm
- Faixa de temperatura ambiente: -35°C +45°C
- Peso: 600g
- Grau de proteção: IP32
- Garantia: 01 ano

### **3.2. Protótipo do Sistema**

Para análises referentes à previsão de geração de energia e desempenho do projeto, acontecerão testes em menor escala que a necessária para atendimento às demandas de um veículo autônomo como o trabalhado. Desse modo, os componentes utilizados são os equivalentes dos de um sistema fotovoltaico convencional em um universo menor, sendo o módulo fotovoltaico substituído por uma mini célula solar, o controlador de carga por carregador solar e assim por diante.

A partir da análise dos resultados obtidos referentes a essa escala, torna-se possível prever os resultados para outras escalas maiores, podendo o projeto ser aplicado até em veículos de maior porte. Para tal, um protótipo foi desenvolvido para o sistema energético, com o uso de um seguidor solar de dois eixos e a aplicação de estratégias de aproveitamento máximo da irradiância.

Visando a verificação da viabilidade de do protótipo, foram idealizados 3 cenários comparativos de testes: painel fixo com uso de um carregador MPPT comparado ao painel fixo sem uso de um carregador MPPT (para comprovar a viabilidade da utilização da função MPPT); painel fixo sem uso de um carregador MPPT comparado ao seguidor solar de dois eixos sem uso de um carregador MPPT (para comprovar a viabilidade da utilização do seguidor); e painel fixo sem uso de um carregador MPPT comparado ao seguidor solar de dois eixos com uso de um carregador MPPT (para quantificar o ganho de potência proporcionado pelo protótipo em relação a um sistema fotovoltaico convencional). Desse modo, a seguir são demonstradas as etapas trabalhadas.



### 3.2.1 Montagem do Protótipo

Com o intuito de atender às necessidades do sistema proposto, faz-se necessária a aplicação de estratégias de aproveitamento da energia à qual o mesmo é exposto. Nessa linha, é trazido o conceito de *solar trackers* ou seguidores solares. Dentre tais estratégias, surge a proposta de um sistema de previsão de geração, com o intuito de certificar que a utilização dos seguidores solares, em especial o de dois eixos, é uma aplicação interessante no que se refere à viabilidade econômica e auto suficiência do sistema.

Segundo Kasburg e Stefenon (2019), testes na geração de energia apresentaram resultados que demonstram a viabilidade para módulos com seguidores solares em uma média de eficiência energética de 23,6% maior em relação aos módulos fixos e, com ajustes diários no segmento, de 31,8%.

Portanto, foi desenvolvido um protótipo de seguidor solar ativo de dois eixos a partir de uma mini célula solar (Figura 6). Após uma pesquisa de compras, este modelo foi o que mais se enquadrou com as pretensões do trabalho, tanto em relação ao tamanho quanto à potência, para confecção do referido protótipo. Na montagem da Figura 7, Kasburg e Stefenon (2019) desenvolveram uma ligação do seguidor solar e de um painel fixo para observação e comparação dos resultados.



Figura 6: Mini Célula Solar

Fonte: Mercado Livre, 2021



Figura 7: Modelo de Protótipo de Seguidor Solar

Fonte: Kasburg e Stefenon, 2019

Tal mini célula é capaz de gerar 6V de tensão e promover uma alimentação de até 200mA, trabalhando com uma potência nominal máxima de 1000mW, com as seguintes especificações:

- Tensão de trabalho: 6V
- Corrente nominal máxima de saída: 200mA
- Potência nominal máxima: 1000mW
- Dimensões: 110 x 60 x 2,5mm

### **3.2.1.1 Confeção do Seguidor Solar de Dois Eixos**

O volume de luz solar que incide sobre a face de um módulo depende diretamente de seu ângulo de incidência em relação à fonte de luz (Kasburg e Stefenon, 2019). Desse modo, a confecção de um sistema em malha fechada com sensores de luminosidade (LDRs) responsáveis por quantificar o iluminamento.

Assim, indica-se qual a posição do sol para que o microcontrolador determine a melhor posição do PV, de modo que esteja oferecendo a maior área possível para captação dos raios solares e envie sinais para os atuadores que, no caso deste sistema, são servomotores que possuem um movimento de até 180° e que podem produzir uma máxima inclinação do mesmo. Para confecção do seguidor solar de dois eixos, além da mini célula especificada acima, foram utilizados materiais e dispositivos eletrônicos responsáveis pela sustentação e correto funcionamento do mesmo. São eles:

- 01 Arduino MEGA 2560 (Microcontrolador ATmega2560);
- 02 Micro servomotores 9g;
- 04 Sensores Resistores Dependentes de Luz (LDRs) de 5mm;
- 04 Resistores de 1k $\Omega$ ;
- 01 Estrutura de MDF encomendada para Seguidor Solar, parafusos e conectores.

A montagem da estrutura de MDF (Figura 8) do seguidor solar foi feita acoplando-se nela os servomotores, um em sua parte lateral interna (Figura 9) e o outro em sua base circular (Figura 10), a proporcionar, ao mesmo, dois graus de liberdade (movimentação Norte-Sul e Leste-Oeste).

Desse modo, na presença de luz, o Arduino MEGA 2560 (Figura 11) recebe os dados dos LDRs, que se localizam na parte superior da estrutura separados por divisórias (Figura 12) e cada um conectado a um resistor conectado ao GND, e envia os comandos aos atuadores (servomotores) para que posicionem a mini célula (Figura 13) no ponto de máximo aproveitamento de irradiância.

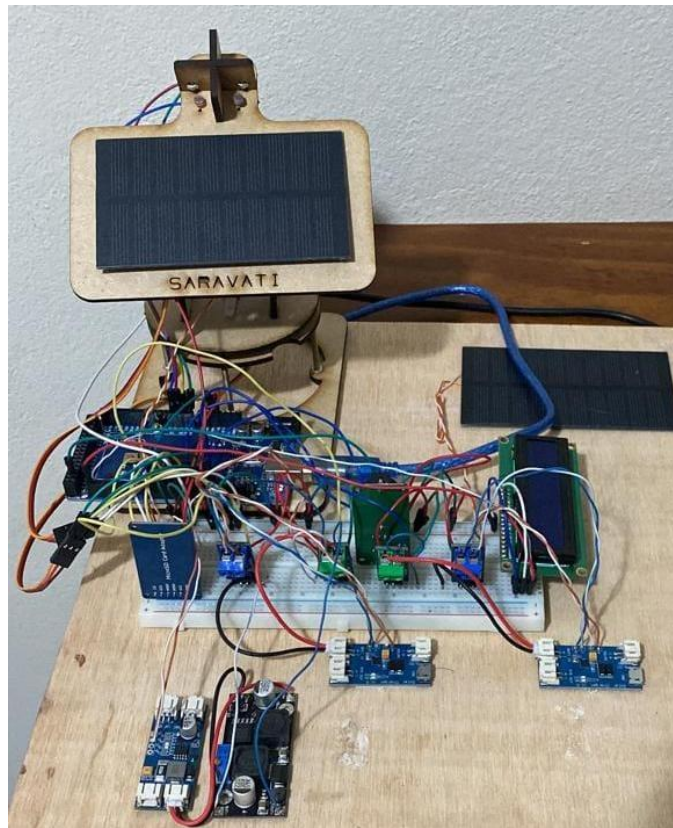


Figura 8: Estrutura MDF do Seguidor com Montagem

Fonte: O Autor

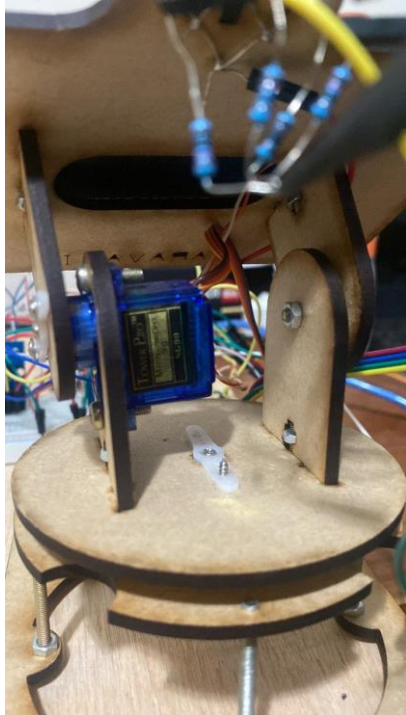


Figura 9: Servomotor Lateral

Fonte: O Autor

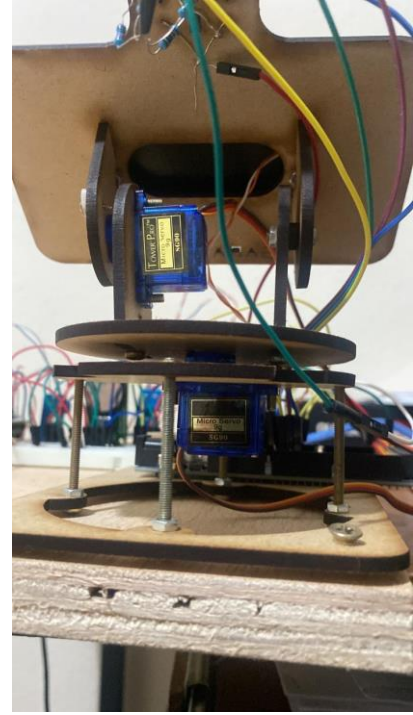


Figura 10: Servomotor Base Circular

Fonte: O Autor

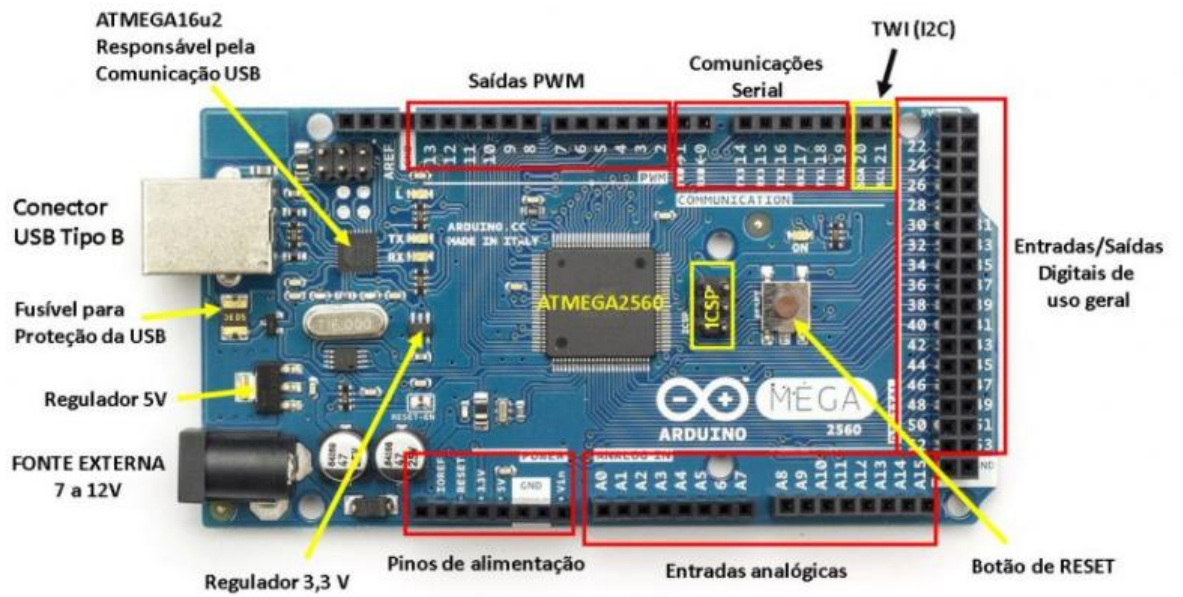


Figura 11: Descrição Arduino MEGA 2560

Fonte: Disponível em <https://www.embarcados.com.br/arduino-mega-2560/>

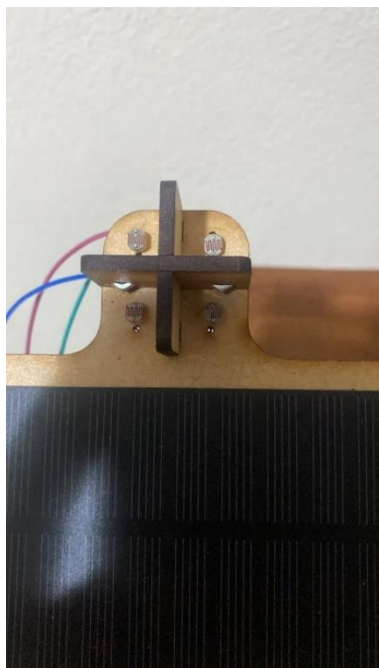


Figura 12: LDRs do Protótipo

Fonte: O Autor



Figura 13: Mini Célula Solar do Protótipo

Fonte: O Autor

Os 4 LDRs do seguidor solar foram conectados nos pinos A1, A2, A3 e A0 do Arduino, além da alimentação ligada ao 5V. O LDR superior esquerdo foi conectado ao pino A0, o superior direito ao pino A2, o inferior esquerdo ao pino A1 e, finalmente, o inferior direito ao pino A3. Os pinos de alimentação dos servomotores foram ligados ao 5V e ao GND e os seus sinais digitais conectados aos pinos 9 e 10, respectivamente.

A simulação (Figuras 14 e 15) desta etapa foi desenvolvida através da plataforma TinkerCAD da Autodesk, na qual foi possível simular alterações na quantidade de luz incidente nos LDRs individualmente, observando-se a rotação dos servomotores.

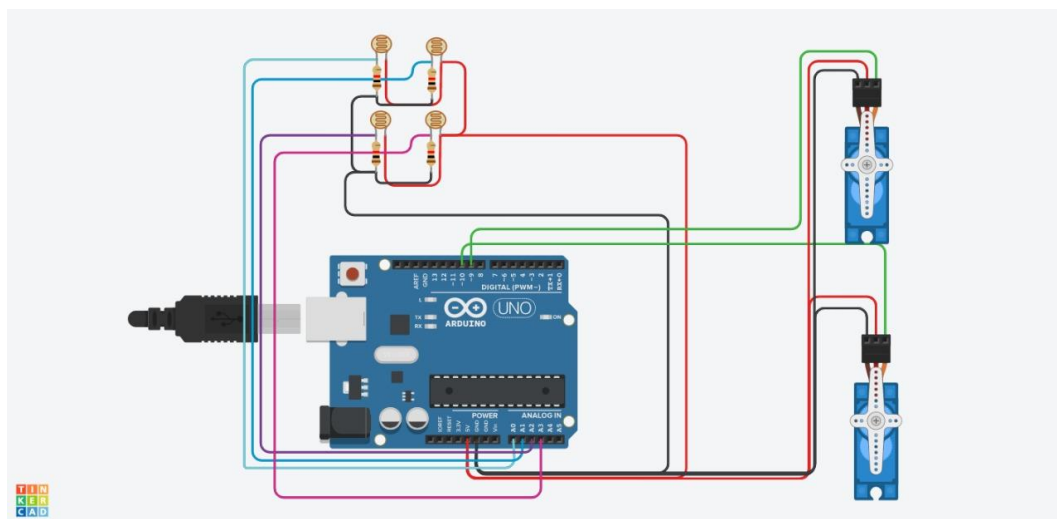


Figura 14: Simulação Seguidor Solar TinkerCAD

Fonte: O Autor

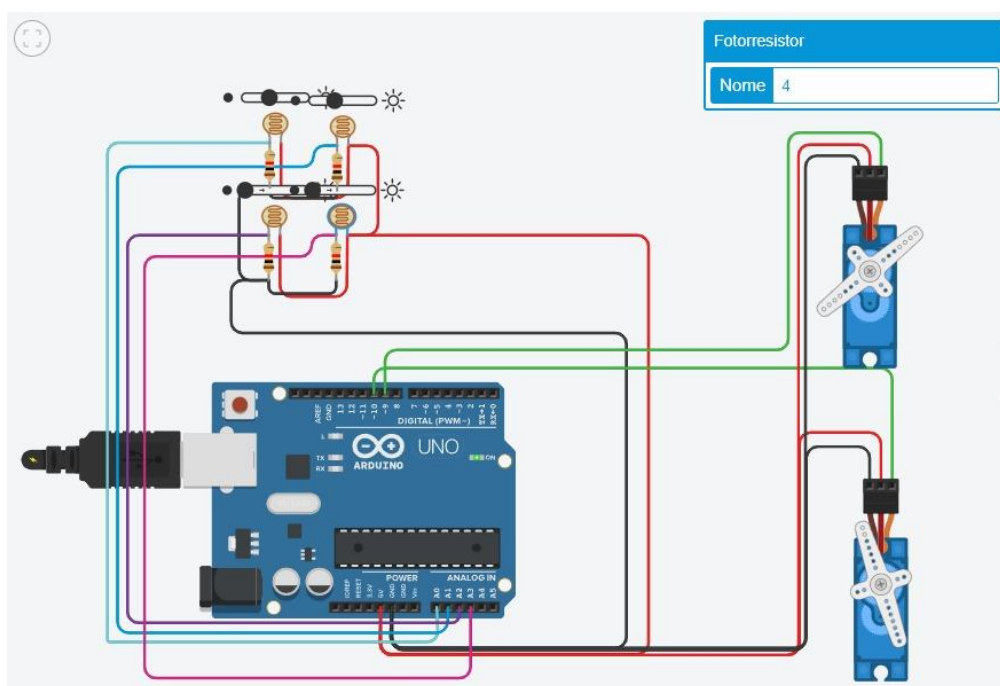


Figura 15: Simulação Seguidor Solar com Alteração da Incidência Solar

Fonte: O Autor

Na simulação foi utilizado o mesmo código a ser utilizado em campo, bem como a montagem pontual desta parte do protótipo, sendo possível analisar o comportamento do circuito e seus componentes mediante alterações da incidência solar.

### 3.2.1.2 Estratégias de aproveitamento máximo da irradiância

Inicialmente, foi idealizada a utilização de um Arduino UNO para confecção do protótipo. No entanto, houve a preferência pela utilização do Arduino MEGA 2560 justificada pelo seu maior número de portas analógicas, essenciais para ligação de todos os componentes, além dos fatos de que ele possui quatro vezes mais memória de armazenamento e oito vezes mais memória de funcionamento que o UNO.

Sendo assim, tornou-se o dispositivo ideal para recebimento e processamento do volume dos dados necessários, referentes a diferentes estados de incidência solar em determinadas partes do dia.

Tais dados são referentes à potência e data e hora, sendo interpretados em tempo real, respectivamente, por sensores de corrente (Figura 16) e de tensão (Figura 17) e um dispositivo RTC (Figura 18), sendo armazenados em um computador no formato .txt. Desse modo, é possível sua transferência a planilhas, que são responsáveis por embasar as análises comparativas dos cenários que atestam a viabilidade do protótipo.



Figura 16: Sensor de Corrente ACS712

Fonte: O Autor



Figura 17: Sensor de Tensão

Fonte: O Autor



Figura 18: Módulo Real-Time Clock

Fonte: O Autor

### 3.2.1.2 Integração com a bateria

Cada uma das duas mini células solares (uma de cada estratégia dentro de cada cenário) fornecem uma potência máxima de 1000mW ao protótipo que, por sua vez, utiliza seus recursos para captar o máximo de radiação solar possível. Para o armazenamento e observação da energia gerada foi integrada ao protótipo uma bateria CR123a de lítio recarregável (Figura 20) de 3,7V e 3000mAh para cada estratégia, que é carregada a partir de um carregador solar CN3791 MPPT (Figura 21) ou de um carregador solar CN3065 (Figura 22) interligado à fonte de energia (mini célula solar).

O primeiro exerce a função de seguir o ponto de maior potência da mini célula para todas as angulações que serão experimentadas pelo seguidor solar, obtendo-se, assim, um ganho expressivo de energia gerada a ser observado. No entanto, isso só ocorre quando há a conexão a um Conversor Buck-Boost DC-DC (Figura 23).

A principal característica deste tipo de conversor é a capacidade de abaixar ou elevar determinada tensão contínua e, para esta aplicação, é responsável por elevar o nível da tensão contínua ao ponto necessário para a entrega da máxima potência à carga, habilitando, assim, a função MPPT do carregador (Shadman, 2018).





Figura 19: Bateria Recarregável CR123a 3.7V

Fonte: O Autor

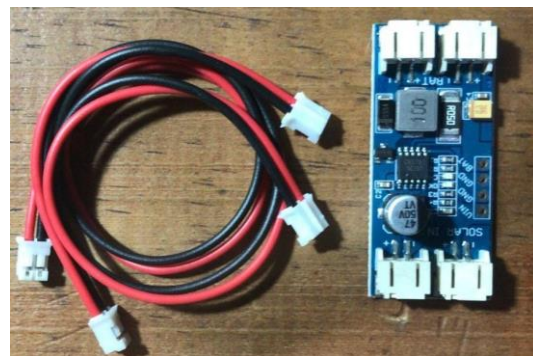


Figura 20: Carregador Solar CN3791 MPPT

Fonte: O Autor



Figura 21: Carregador Solar CN3065

Fonte: O Autor



Figura 22: Conversor Buck-Boost DC-DC

Fonte: O Autor

Segundo Lelis (2018), há condicionamento de tensão e corrente pelos conversores eletrônicos para os dispositivos de carga ou armazenamento de energia de acordo com a natureza do processo (carregamento ou descarregamento), pelo fato de o requisito de carga obter variações rápidas dependendo da aplicação em veículos elétricos.

Como são analisadas duas estratégias ao mesmo tempo dentro de cada cenário, cada uma conta com um sensor de corrente e um de tensão que geram dados que, multiplicados, fornecem o valor de potência da mesma. O sensor de corrente referente ao CN3791 MPPT é alimentado pelo positivo proveniente do conversor e alimenta a bateria referente ao seu circuito.

Já no sensor de tensão, são colocados jumpers nos bornes positivo e negativo do mesmo que, por sua vez, são conectados aos terminais da bateria. Nos sensores referentes ao CN3065

ocorre da mesma forma, porém sem o uso do conversor. No que se refere às estratégias que utilizam o painel fixo, ela também é conectada diretamente ao determinado carregador.

Para os sensores de corrente e tensão, existem 3 pinos: VCC, GND e Out, sendo o último responsável pela saída de dados e conectados aos terminais A4, A5, A6 e A7 do Arduino, enquanto os demais alimentam os 4 sensores. O dispositivo RTC foi alimentado nos pinos VCC e GND, com conexão do pino RST ao terminal 8, do DAT ao 10 e do CLK ao 22.

### **3.2.2 Testes**

Mediante à realização da montagem do protótipo, faz-se necessária a análise de sua viabilidade a partir de testes de funcionamento. Tais testes foram divididos em três etapas: Testes Preliminares, Primeira Bateria de Testes Oficiais (Sem MPPT) e Segunda Bateria de Testes Oficiais (Com MPPT). Os Testes Preliminares foram realizados em Ouro Preto-MG e os demais na cidade de Vespasiano-MG.

#### **3.2.2.1 Testes Preliminares**

Nesta primeira abordagem, o protótipo foi levado a campo no Campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto, localizado no Bairro Bauxita – Ouro Preto-MG, em março de 2022. Nela foram analisados 3 Cenários, sendo eles:

- Cenário 1: Painel Convencional x Seguidor com MPPT;
- Cenário 2: Painel Convencional x Seguidor sem MPPT;
- Cenário 3: Painel Convencional x Painel Fixo com MPPT.

Entende-se como Painel Convencional, aquele amplamente utilizado no mercado, tendo em vista sua aplicação e métodos de geração de energia dispostos na literatura. Ele surge nos testes, em geral, como parâmetro central para níveis de comparação, uma vez que o intuito dos testes é avaliar o ganho previsto pelas estratégias abordadas nos capítulos anteriores.

Para ocorrência dos testes, o protótipo foi colocado sobre o teto de uma caminhonete do modelo Saveiro, com um operador responsável por segurar a estrutura do mesmo e observar o andamento da aquisição dos dados e outro responsável por dirigir, fazendo-se o percurso Oeste-Leste e Norte-Sul (ida e volta).

Nesta etapa, os horários de testes feitos não foram específicos, uma vez que o grande objetivo da mesma foi a percepção do funcionamento da montagem e preparação para as baterias de testes seguintes. Desse modo, a Tabela 1 traz o conhecimento dos dados preliminares obtidos em campo na latitude sul 20°23'41.1" e longitude 43°30'44.9", aproximadamente.

Tabela 1 - Dados dos Testes Preliminares

		Dia 1 - Quinta-feira, 03 de Março de 2022																			
		Cenário 1						Cenário 2						Cenário 3							
		Painel Convencional			Seguidor com MPPT			Painel Convencional			Seguidor sem MPPT			Painel Convencional			Painel Fixo com MPPT				
		Tensão Média (V)	Corrente Média (A)	Potência Média (W)	Tensão Média (V)	Corrente Média (A)	Potência Média (W)	Tensão Média (V)	Corrente Média (A)	Potência Média (W)	Tensão Média (V)	Corrente Média (A)	Potência Média (W)	Tensão Média (V)	Corrente Média (A)	Potência Média (W)	Tensão Média (V)	Corrente Média (A)	Potência Média (W)		
T e s t e	Horário	Sentido																			
			1	06:30	O->L	4,42	0,01	0,06	1,19	0,01	0,01										
07:20	L->O	4,61		0,09	0,40	2,38	0,08	0,19													
08:20	S->N	5,14		0,10	0,52	7,15	0,11	0,78													
08:30	N->S	4,87		0,11	0,52	4,98	0,11	0,55													
09:10	O->L								5,69	0,11	0,65	5,58	0,12	0,71							
09:20	L->O								5,50	0,12	0,64	5,62	0,13	0,75							
10:30	S->N								4,70	0,15	0,72	5,78	0,17	1,04							
10:45	N->S								4,65	0,12	0,57	5,62	0,15	0,83							
11:00	O->L														4,57	0,12	0,54	9,21	0,12	1,10	
11:20	L->O														4,59	0,12	0,54	9,31	0,13	1,21	
11:30	S->N														4,59	0,12	0,55	9,58	0,13	1,28	
11:40	N->S													4,59	0,21	0,97	9,41	0,14	1,29		
2	13:00	O->L	4,74	0,14	0,66	9,14	0,12	1,12													
	13:15	L->O	5,03	0,12	0,63	9,07	0,14	1,23													
	13:25	S->N	4,90	0,15	0,72	6,33	0,26	1,50													
	13:35	N->S	5,11	0,13	0,65	9,29	0,13	1,23													
	13:50	O->L							5,40	0,12	0,65	5,62	0,15	0,87							
	14:00	L->O							6,22	0,17	1,11	6,26	0,24	1,54							
	14:10	S->N							5,59	0,15	0,85	6,02	0,17	1,09							
	14:15	N->S							5,14	0,12	0,63	5,48	0,14	0,74							
	14:30	O->L													5,41	0,29	1,55	8,83	0,13	1,13	
	14:35	L->O													5,39	0,19	1,00	8,36	0,12	1,02	
14:40	S->N													5,34	0,15	0,81	8,46	0,12	1,05		
14:50	N->S													5,21	0,14	0,73	7,82	0,13	1,01		
3	15:50	O->L	5,10	0,24	1,19	5,35	0,24	1,15													
	16:00	L->O	5,50	0,18	1,02	6,55	0,17	1,05													
	16:10	S->N	5,05	0,24	1,23	7,81	0,24	1,78													
	16:15	N->S	5,22	0,16	0,86	7,57	0,16	1,25													
	16:30	O->L							5,08	0,27	1,29	4,86	0,24	1,22							
	16:35	L->O							5,28	0,19	1,02	4,73	0,14	0,67							
	16:45	S->N							4,76	0,14	0,66	4,70	0,24	1,12							
	16:50	N->S							4,81	0,18	0,89	4,78	0,34	1,68							
		O->L																			
	L->O																				
	S->N																				
	N->S																				

Fonte: O Autor

A partir da análise dos dados, foi possível a realizações de algumas constatações referentes ao funcionamento do protótipo e seus respectivos componentes. São elas:

- Quando há baixa incidência solar como em períodos nublados e nos períodos de sol nascente e sol poente, o Conversor DC-DC que atua em conjunto com o Carregador MPPT não conduz abaixo de uma tensão mínima de 3V.

- O Carregador MPPT, de acordo com sua característica de trabalhar em um nível de máxima potência, teve observância de uma tensão entre 5,0V e 6,0V quando a bateria associada estava em estado de “carregando” e valores superiores de tensão em faixa ajustada pelo Conversor DC-DC (que tem um limite de 35V) quando em estado de “carregado”. Sendo assim, para que a análise correta fosse feita, seria necessário que as baterias estivessem sempre no estado de “carregando”.
- Foi observada a necessidade de um tempo determinado de espera de, em média, 30 segundos, para estabilização dos níveis de corrente fornecidos pelos sensores de corrente.
- Em teste de carga feito com as baterias, foi observado que o sistema teve a capacidade de carrega-las desde a descarga total em, aproximadamente, 58 minutos. No entanto, para aquisição dos níveis necessários para correta execução, basta as baterias iniciarem em um mesmo nível de carga e se estabelecerem no estado de “carregando”.
- O Conversor DC-DC provoca uma queda de tensão aproximada a um nível de 2,8V em sua entrada, entregando na saída o nível de tensão de 5,0 a 6,0V quando acima deste valor de entrada e 0,0V quando abaixo.

O grande objetivo desta abordagem inicial, com os Testes Preliminares, foi o de analisar pontualmente os elementos integrados ao sistema, bem como suas características e comportamento. De modo geral, fazer constatações baseadas na observância dos experimentos em horários diferentes, com condições diferentes e em configurações diferentes de montagem, para analisar pontualmente os dispositivos.

No entanto, para que haja confiabilidade destas constatações, faz-se necessária a adequação dos testes em padronização de horários, condições e configurações, de modo a observar o comportamento energético geral do protótipo. Para tal, foi iniciada a Primeira Bateria de Testes Oficiais, descrita a seguir.

### **3.2.2.2 Primeira Bateria de Testes Oficiais (Sem MPPT)**

A partir das conclusões feitas nos Testes Preliminares, uma base de informações para a Primeira Bateria de Testes Oficiais foi adquirida. Todas as ações desta etapa se deram com

observância dos fatos decorrentes da primeira e foram desenvolvidas novas estratégias para correção das debilidades assinaladas, como a necessidade de manter as baterias em nível de “carregando” (devido ao fato de que, ao chegar ao estado de carga completa, a resistência provocada pela bateria fica mínima e o carregador não atua, tendo a tensão máxima regulada pelo Conversor aplicada em sua entrada). Isto pôde ser resolvido a partir da aplicação de resistores nos pólos da bateria que provocaram descarga através do circuito, aliados a LEDs para sinalizar seu funcionamento.

Além disso, a de manter o protótipo fixo por parafusos na caminhonete (desta vez, um modelo Ford Ranger 1996) para que não houvessem oscilações de movimento que resultassem em dados inconsistentes, a de manter o painel convencional direcionado para o norte com a angulação da latitude do local (Almeida, 2016) e, finalmente, que os testes devem ser desenvolvidos dentro de uma faixa de horário específica e padrão, para que a análise feita seja com parâmetros iguais.

Dessa maneira, foi retirado o percurso de volta de cada teste para que coubessem dentro das faixas de horários estabelecidas e uma vez que as conclusões buscadas são possíveis com apenas uma passagem pelo percurso. Sendo assim, a Primeira Bateria de Testes Oficiais foi realizada contemplando um percurso Oeste-Leste e um Sul-Norte na latitude sul  $19^{\circ}41'31''$  e longitude oeste  $43^{\circ}55'24''$ , aproximadamente.

### **3.2.2.2.1 Melhorias de Montagem**

Tendo em vista a melhor aquisição de dados e posterior entrega de resultados, foram feitas adaptações no protótipo em relação à etapa anterior. São elas:

- Fixação do Protótipo ao Santo Antônio da caminhonete utilizando parafusos, para impedir que a movimentação dela ao longo do trajeto causasse alterações nos dados ou desestabilização da leitura dos sensores, como na Figura 23;

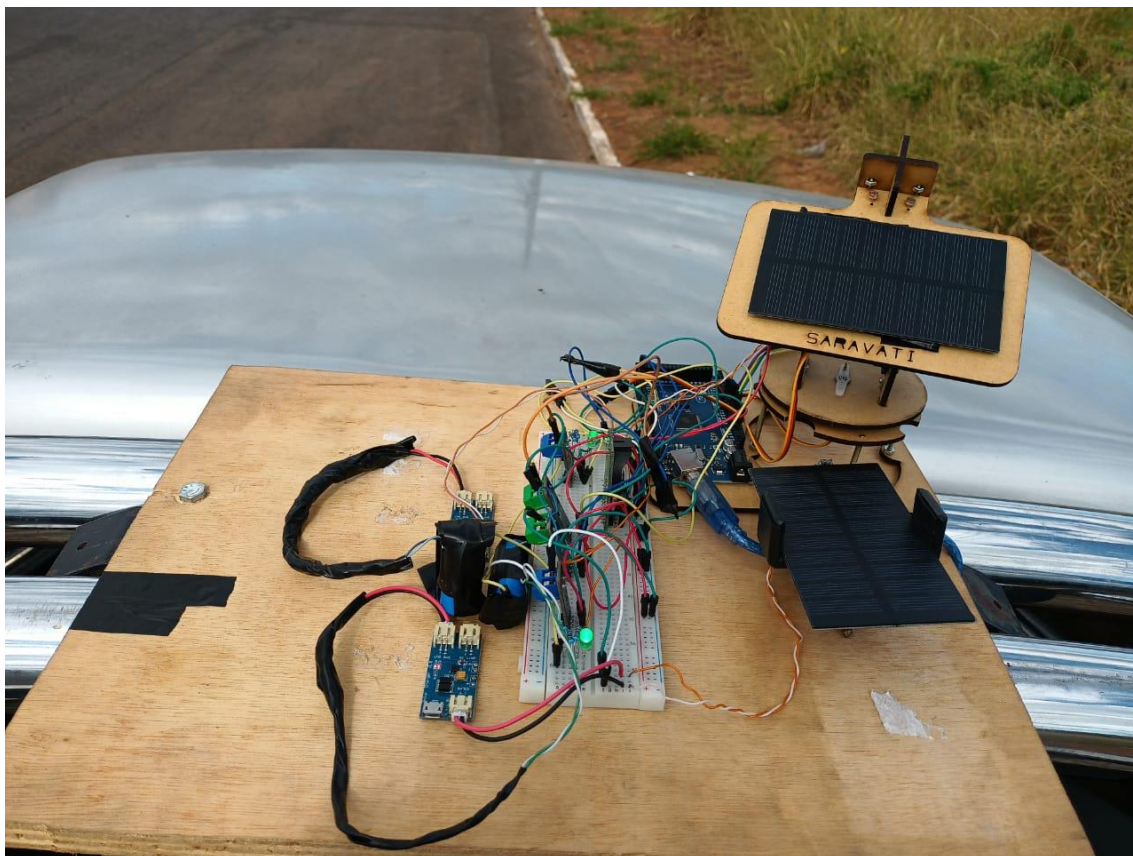


Figura 23: Fixação do Protótipo

Fonte: O Autor

- Ajuste do painel convencional para a direção norte em  $19^\circ$  em cada trecho percorrido, seguindo padronização referente aos painéis comumente aplicados em sistemas fotovoltaicos (Figura 24);



Figura 24: Demonstração da Angulação aplicada no Painel Convencional

Fonte: O Autor

- Conexão aos pólos das baterias de dois resistores de  $10k\Omega$  em paralelo com um LED em cada uma, para não permitir que elas se carreguem completamente (Figura 25);



Figura 25: Demonstração do Circuito de Descarga das Baterias

Fonte: O Autor

#### **3.2.2.2.2 Análises da Coleta dos Dados**

A partir das adaptações feitas, os testes foram todos realizados com sucesso. Ao todo, nessa bateria, foram realizados 30 testes, sendo feitos 6 por dia, durante 5 dias, nas faixas de horário de 06:00 às 07:00, de 08:00 às 09:00, de 10:00 às 11:00, de 12:00 às 13:00, de 14:00 às 15:00 e de 16:00 às 17:00.

Os percursos feitos foram Oeste a Leste (500m aproximadamente) e Sul a Norte (500m aproximadamente), com velocidade média de 15 km/h e ajustes da direção do painel convencional em cada inicialização. Foram usados nessa abordagem, um carregador CN3065 para cada painel solar (o painel convencional e o painel do Seguidor Solar). O principal objetivo nessa etapa era a análise da viabilidade do Seguidor Solar desenvolvido.

##### **3.2.2.2.2.1 Análise das Médias**

Os dias utilizados para os testes foram 17, 18, 22, 23 e 24 de Março de 2022, com, aproximadamente, 35 pontos de coleta dos dados referentes a tensão e corrente que calculam pelo código os dados de potência, relacionados ao tempo real. A partir dos dados coletados a cada 6 segundos, foi feita a média entre todos eles e criadas as tabelas de médias referentes a cada dia, conforme demonstrado nas Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6:



Tabela 2 - Tabela de Médias do Dia 1

			Dia 1 - Quinta-Feira, 17 de Março de 2022					
			Tabela de Médias					
			Painel Convencional			Seguidor Solar		
	Horário	Sentido	Valor médio de tensão (V)	Valor médio de corrente (A)	Valor médio de potência (W)	Valor médio de tensão (V)	Valor médio de corrente (A)	Valor médio de potência (W)
Teste 1	06:00 - 07:00	O->L	4,59	0,12	0,57	4,66	0,13	0,61
		S->N	4,27	0,10	0,45	4,42	0,11	0,47
Teste 2	08:00 - 09:00	O->L	4,68	0,11	0,52	5,11	0,12	0,60
		S->N	4,86	0,11	0,54	5,11	0,12	0,59
Teste 3	10:00 - 11:00	O->L	4,96	0,12	0,60	5,52	0,14	0,77
		S->N	4,65	0,12	0,55	4,96	0,12	0,58
Teste 4	12:00 - 13:00	O->L	4,79	0,11	0,53	5,06	0,12	0,62
		S->N	4,75	0,11	0,53	4,90	0,13	0,64
Teste 5	14:00 - 15:00	O->L	5,05	0,12	0,58	4,72	0,13	0,60
		S->N	4,86	0,11	0,56	4,33	0,12	0,53
Teste 6	16:00 - 17:00	O->L	4,53	0,12	0,55	5,16	0,13	0,65
		S->N	4,70	0,12	0,54	4,80	0,13	0,60
MÉDIA DO DIA			4,72	0,12	0,54	4,90	0,12	0,60

Fonte: O Autor

No dia 1, foi possível perceber que a configuração do Seguidor Solar obteve um ganho diário aparente de potência de 11,1%, em relação ao Painel Convencional. Este ganho diário aparente de potência é o valor percentual que quantifica o quanto determinada estratégia adotada teve a mais de potência em relação à convencional. Neste dia, foi realizado um Teste Extra, no horário das 18:00 às 19:00, no qual foi possível atestar a inviabilidade do horário para testes e que não foram incluídos na média para análise de ganho.

Tabela 3 - Tabela de Médias do Dia 2

			Dia 2 - Sexta-Feira, 18 de Março de 2022					
			Tabela de Médias					
			Painel Convencional			Seguidor Solar		
	Horário	Sentido	Valor médio de tensão (V)	Valor médio de corrente (A)	Valor médio de potência (W)	Valor médio de tensão (V)	Valor médio de corrente (A)	Valor médio de potência (W)
Teste 7	06:00 - 07:00	O->L	3,91	0,12	0,48	4,18	0,12	0,50
		S->N	4,12	0,10	0,39	4,21	0,12	0,49
Teste 8	08:00 - 09:00	O->L	4,61	0,13	0,61	5,18	0,13	0,69
		S->N	4,69	0,12	0,55	5,15	0,15	0,78
Teste 9	10:00 - 11:00	O->L	4,70	0,12	0,58	5,28	0,15	0,78
		S->N	4,62	0,11	0,52	4,85	0,12	0,58
Teste 10	12:00 - 13:00	O->L	4,82	0,13	0,60	4,91	0,13	0,62
		S->N	4,82	0,12	0,58	4,84	0,13	0,62
Teste 11	14:00 - 15:00	O->L	4,73	0,12	0,56	4,77	0,14	0,67
		S->N	4,83	0,12	0,58	4,84	0,12	0,59
Teste 12	16:00 - 17:00	O->L	4,69	0,11	0,54	5,33	0,12	0,66
		S->N	4,46	0,11	0,50	4,44	0,12	0,54
MÉDIA DO DIA			4,58	0,12	0,54	4,83	0,13	0,62

Fonte: O Autor

No dia 2, o ganho diário aparente de potência foi bem maior: 14,8%. Isso se deve ao fato de ter sido um dia com menor ocorrência de nuvens, além de não ter sido realizado o teste extra, das 18:00, como no primeiro dia.

Tabela 4 - Tabela de Médias do Dia 3

			Dia 3 - Terça-Feira, 22 de Março de 2022					
			Tabela de Médias					
			Painel Convencional			Seguidor Solar		
	Horário	Sentido	Valor médio de tensão (V)	Valor médio de corrente (A)	Valor médio de potência (W)	Valor médio de tensão (V)	Valor médio de corrente (A)	Valor médio de potência (W)
Teste 13	06:00 - 07:00	O->L	4,32	0,10	0,42	4,66	0,11	0,49
		S->N	3,80	0,09	0,34	3,92	0,10	0,39
Teste 14	08:00 - 09:00	O->L	4,54	0,12	0,54	5,12	0,13	0,68
		S->N	4,58	0,10	0,48	4,99	0,12	0,58
Teste 15	10:00 - 11:00	O->L	5,02	0,10	0,52	4,87	0,13	0,63
		S->N	4,63	0,13	0,59	5,00	0,12	0,61
Teste 16	12:00 - 13:00	O->L	4,99	0,11	0,54	5,43	0,12	0,63
		S->N	4,74	0,12	0,54	4,89	0,12	0,59
Teste 17	14:00 - 15:00	O->L	4,82	0,11	0,53	4,97	0,13	0,65
		S->N	4,75	0,11	0,53	4,73	0,13	0,61
Teste 18	16:00 - 17:00	O->L	4,47	0,10	0,47	4,71	0,12	0,57
		S->N	4,29	0,11	0,47	4,19	0,12	0,50
MÉDIA DO DIA			4,58	0,11	0,50	4,79	0,12	0,58

Fonte: O Autor

No dia 3, o ganho foi ainda maior que no dia 2. Isso se deve a maiores períodos ensolarados, nos quais os valores das potências, tanto do Painel Convencional quanto do Seguidor Solar ficaram acima dos referentes ao dia anterior. Desse modo, foi percebido um ganho diário aparente de potência de 16%.

Tabela 5 - Tabela de Médias do Dia 4

		Dia 4 - Quarta-Feira, 23 de Março de 2022						
		Tabela de Médias						
		Painel Convencional			Seguidor Solar			
	Horário	Sentido	Valor médio de tensão (V)	Valor médio de corrente (A)	Valor médio de potência (W)	Valor médio de tensão (V)	Valor médio de corrente (A)	Valor médio de potência (W)
Teste 19	06:00 - 07:00	O->L	3,82	0,10	0,39	4,02	0,11	0,44
		S->N	4,28	0,10	0,44	4,35	0,11	0,48
Teste 20	08:00 - 09:00	O->L	4,65	0,10	0,48	5,12	0,11	0,56
		S->N	4,56	0,11	0,48	4,84	0,11	0,55
Teste 21	10:00 - 11:00	O->L	4,80	0,12	0,59	4,96	0,13	0,66
		S->N	4,71	0,11	0,53	4,92	0,12	0,61
Teste 22	12:00 - 13:00	O->L	4,83	0,11	0,54	4,91	0,12	0,58
		S->N	4,87	0,12	0,57	4,92	0,12	0,60
Teste 23	14:00 - 15:00	O->L	4,67	0,11	0,52	5,23	0,12	0,62
		S->N	4,60	0,11	0,52	4,91	0,12	0,58
Teste 24	16:00 - 17:00	O->L	4,37	0,10	0,46	4,88	0,13	0,62
		S->N	4,49	0,12	0,54	4,83	0,12	0,56
MÉDIA DO DIA			4,55	0,11	0,50	4,82	0,12	0,57

Fonte: O Autor

O ganho diário aparente de potência do dia 4 teve um resultado menor que o do dia 3, mesmo que com as condições climáticas muito semelhantes. Sendo assim, o seu valor representou 14%.

Tabela 6 - Tabela de Médias do Dia 5

Dia 5 - Quinta-Feira, 24 de Março de 2022								
Tabela de Médias								
			Painel Convencional			Seguidor Solar		
	Horário	Sentido	Valor médio de tensão (V)	Valor médio de corrente (A)	Valor médio de potência (W)	Valor médio de tensão (V)	Valor médio de corrente (A)	Valor médio de potência (W)
Teste 25	06:00 - 07:00	O->L	3,17	0,10	0,31	3,82	0,11	0,42
		S->N	3,37	0,10	0,33	3,38	0,11	0,37
Teste 26	08:00 - 09:00	O->L	4,56	0,11	0,51	4,98	0,12	0,60
		S->N	4,69	0,11	0,50	4,90	0,11	0,56
Teste 27	10:00 - 11:00	O->L	4,60	0,12	0,53	4,87	0,14	0,67
		S->N	4,64	0,11	0,51	4,92	0,12	0,59
Teste 28	12:00 - 13:00	O->L	4,54	0,11	0,50	4,56	0,14	0,65
		S->N	4,70	0,11	0,53	4,67	0,12	0,56
Teste 29	14:00 - 15:00	O->L	4,66	0,11	0,53	4,79	0,13	0,62
		S->N	4,74	0,12	0,59	4,97	0,14	0,68
Teste 30	16:00 - 17:00	O->L	4,32	0,11	0,47	4,94	0,12	0,59
		S->N	4,26	0,11	0,47	4,30	0,12	0,51
MÉDIA DO DIA			4,35	0,11	0,48	4,59	0,12	0,57

Fonte: O Autor

Finalmente, no quinto e último dia da Primeira Bateria de Testes foi percebido um percentual maior de ganho diário aparente de potência: 18,75%. Pode-se perceber, através das tabelas de médias, que o Seguidor Solar se mostrou mais eficiente energeticamente que o painel convencional para a aplicação móvel em todos os dias de coleta, sinalizando-se a sua viabilidade.

### **3.2.2.2.2 Testes Estatísticos**

Foram realizados 3 Testes Estatísticos (T-test, Anova e Ranksum) com esses dados, visando um grau de confiabilidade de 99%. Seus resultados estão dispostos na Tabela 7, com os dados, onde há diferença estatística neste grau, em verde e os onde não há em vermelho. Há também, para fins comparativos aos valores de Média PC (Painel Convencional) e Média PS (Seguidor Solar), a Mediana PC (Painel Convencional) e Mediana OS (Seguidor Solar).

Tabela 7 - Testes Estatísticos

Dia	Teste	Sentido	T-test	P-valor	Anova	P-valor	Ranksum	P-valor	Média PC	Média PS	Mediana PC	Mediana OS	Horários
1	1	Oeste a Leste		0,7679		0,8326		0,0045	0,5733	0,6062	0,46	0,5	06:00 - 07:00
1	1	Sul a Norte		0,0098		0,0227		0,0218	0,4459	0,4741	0,45	0,48	
1	2	Oeste a Leste		0		0		0	0,5172	0,6038	0,505	0,6	08:00 - 09:00
1	2	Sul a Norte		0		0		0	0,5367	0,5888	0,54	0,58	
1	3	Oeste a Leste		0		0		0	0,5856	0,735	0,57	0,705	10:00 - 11:00
1	3	Sul a Norte		0,0002		0,0032		0,0034	0,5268	0,5634	0,52	0,56	
1	4	Oeste a Leste		0		0,0005		0,0004	0,5341	0,617	0,52	0,6	12:00 - 13:00
1	4	Sul a Norte		0		0,0001		0	0,5311	0,6389	0,53	0,6	
1	5	Oeste a Leste		0,0992		0,3119		0,3106	0,5841	0,6018	0,58	0,6	14:00 - 15:00
1	5	Sul a Norte		0,0027		0,0194		0,01	0,5577	0,5319	0,555	0,53	
1	6	Oeste a Leste		0		0,0001		0	0,5516	0,6533	0,55	0,62	16:00 - 17:00
1	6	Sul a Norte		0,0001		0,0029		0,0046	0,5585	0,6068	0,565	0,605	
2	7	Oeste a Leste		0,6416		0,6952		0,0428	0,4768	0,4964	0,4	0,45	06:00 - 07:00
2	7	Sul a Norte		0		0		0	0,3944	0,4859	0,4	0,47	
2	8	Oeste a Leste		0,0249		0,0699		0,0325	0,6129	0,6859	0,58	0,69	08:00 - 09:00
2	8	Sul a Norte		0		0		0	0,5523	0,7768	0,56	0,73	
2	9	Oeste a Leste		0		0		0	0,5588	0,7359	0,56	0,7	10:00 - 11:00
2	9	Sul a Norte		0		0		0	0,528	0,5764	0,535	0,58	
2	10	Oeste a Leste		0,0237		0,1692		0,2057	0,604	0,6243	0,6	0,63	12:00 - 13:00
2	10	Sul a Norte		0		0		0	0,5752	0,6217	0,57	0,62	
2	11	Oeste a Leste		0		0,0009		0,0016	0,5595	0,6707	0,545	0,625	14:00 - 15:00
2	11	Sul a Norte		0,0659		0,3268		0,1828	0,5786	0,5919	0,58	0,585	
2	12	Oeste a Leste		0		0		0	0,5362	0,6562	0,51	0,64	16:00 - 17:00
2	12	Sul a Norte		0		0,0002		0,0005	0,4981	0,5392	0,495	0,54	
3	13	Oeste a Leste		0		0		0	0,4193	0,4936	0,405	0,5	06:00 - 07:00
3	13	Sul a Norte		0		0		0	0,3376	0,3876	0,34	0,38	
3	14	Oeste a Leste		0		0		0	0,5411	0,6798	0,51	0,62	08:00 - 09:00
3	14	Sul a Norte		0		0		0	0,4754	0,5752	0,48	0,55	
3	15	Oeste a Leste		0		0,017		0,0019	0,5238	0,5907	0,52	0,57	10:00 - 11:00
3	15	Sul a Norte		0		0,0005		0,0001	0,5449	0,6041	0,53	0,6	
3	16	Oeste a Leste		0		0		0	0,5428	0,6338	0,55	0,63	12:00 - 13:00
3	16	Sul a Norte		0		0,0056		0,0118	0,5412	0,5882	0,55	0,58	
3	17	Oeste a Leste		0		0		0	0,5273	0,6468	0,53	0,61	14:00 - 15:00
3	17	Sul a Norte		0		0		0	0,5343	0,608	0,54	0,585	
3	18	Oeste a Leste		0		0		0	0,469	0,5651	0,48	0,56	16:00 - 17:00
3	18	Sul a Norte		0,0059		0,0285		0,0462	0,4718	0,5044	0,48	0,5	
4	19	Oeste a Leste		0		0,0044		0,0028	0,3903	0,4422	0,39	0,425	06:00 - 07:00
4	19	Sul a Norte		0,0002		0,0202		0,0084	0,4402	0,4846	0,42	0,48	
4	20	Oeste a Leste		0		0		0	0,477	0,5622	0,47	0,55	08:00 - 09:00
4	20	Sul a Norte		0		0		0	0,484	0,5517	0,5	0,54	
4	21	Oeste a Leste		0,0014		0,038		0,0091	0,5682	0,6364	0,54	0,59	10:00 - 11:00
4	21	Sul a Norte		0		0		0	0,5306	0,603	0,52	0,61	
4	22	Oeste a Leste		0		0		0	0,5358	0,5842	0,535	0,585	12:00 - 13:00
4	22	Sul a Norte		0,0007		0,0128		0,0142	0,5722	0,5973	0,56	0,6	
4	23	Oeste a Leste		0		0		0	0,5198	0,616	0,51	0,62	14:00 - 15:00
4	23	Sul a Norte		0		0,0001		0	0,5243	0,5774	0,52	0,58	
4	24	Oeste a Leste		0		0		0	0,4555	0,6166	0,46	0,58	16:00 - 17:00
4	24	Sul a Norte		0,1531		0,2586		0,076	0,5429	0,5603	0,53	0,56	
5	25	Oeste a Leste		0		0		0	0,3051	0,4151	0,3	0,4	06:00 - 07:00
5	25	Sul a Norte		0		0,0018		0,0003	0,3276	0,3749	0,32	0,37	
5	26	Oeste a Leste		0		0,0002		0	0,5081	0,5989	0,485	0,58	08:00 - 09:00
5	26	Sul a Norte		0		0		0	0,504	0,5593	0,49	0,55	
5	27	Oeste a Leste		0		0		0	0,5397	0,6471	0,52	0,62	10:00 - 11:00
5	27	Sul a Norte		0		0		0	0,5178	0,5975	0,515	0,595	
5	28	Oeste a Leste		0		0,0004		0,0001	0,4993	0,6507	0,5	0,6	12:00 - 13:00
5	28	Sul a Norte		0,0002		0,0518		0,0583	0,529	0,5648	0,52	0,56	
5	29	Oeste a Leste		0		0,0002		0,0001	0,5328	0,623	0,52	0,6	14:00 - 15:00
5	29	Sul a Norte		0,0001		0,001		0	0,59	0,6835	0,56	0,65	
5	30	Oeste a Leste		0		0		0	0,4696	0,5939	0,47	0,56	16:00 - 17:00
5	30	Sul a Norte		0		0,0018		0,0027	0,4387	0,5168	0,43	0,49	

Fonte: O Autor

Pode-se perceber que os testes estatísticos não acusaram um padrão referente a horários ao longo dos dias testados. A cor verde indica a existência de diferença estatisticamente significativa entre as médias (T-test e Anova) ou medianas (Rank Sum) com nível de confiança

de 99%, enquanto a cor vermelha indica a conclusão oposta. Desse modo, os testes oferecem consistência dos dados e também das coletas realizadas. Obteve-se, portanto, diferença estatisticamente em todos os testes, exceto:

- 06:00 às 07:00: Dia 1, de Oeste a Leste e Sul a Norte; Dia 2, de Oeste a Leste e Dia 4, de Sul a Norte;
- 08:00 às 09:00: Dia 2, de Oeste a Leste;
- 10:00 às 11:00: Dia 4, de Oeste a Leste;
- 12:00 às 13:00: Dia 2, de Oeste a Leste; Dia 3, de Sul a Norte; Dia 4, de Sul a Norte e Dia 5, de Sul a Norte;
- 14:00 às 15:00: Dia 1, de Oeste a Leste e Sul a Norte e Dia 2, de Sul a Norte;
- 16:00 às 17:00: Dia 3, de Sul a Norte e Dia 4, de Sul a Norte.

Nestes testes, não foi percebida diferença estatística significativa entre os valores comparados em algum dos testes, com grau de confiança de 99%, isto é, o p-valor encontrado nestes casos foi maior que 0,01. Isso pode acontecer por vários motivos, dentre eles problemas operacionais na realização da coleta dos dados, influência de fatores não controlados conhecidos e condições climáticas.

#### **3.2.2.2.2.3 Análise Percentual**

Considerando-se um Ganho Percentual das médias dos valores de potência apresentados pelo Painel Convencional em relação ao Painel com Seguidor Solar, obtém-se a Tabela 8.





utilizando-se a estratégia do Seguidor Solar em relação ao que é hoje convencional para geração de energia fotovoltaica.

Tal ganho representa a viabilidade de aplicação do Seguidor Solar no veículo autônomo que faz o diagnóstico de trincas nos dormentes de aço da EFVM, uma vez que já é capaz de oferecer uma carga energética a suas baterias quase 20% maior que na instalação de um sistema fotovoltaico convencional. Ou seja, oferece um tempo de trabalho do veículo maior, sem paradas para recarga ou troca de baterias, além de contribuir com o aumento da vida útil das mesmas.

#### 3.2.2.2.4 Comparativo de Eficiência Energética Geral

Em busca do comparativo geral entre a energia gerada pelo Painel Convencional e o Seguidor Solar, foi feita uma análise baseada nos valores de potência média encontrados. As Tabelas 9 e 10 demonstram, em vermelho, os valores de potência onde não há diferença estatisticamente e, em preto, onde há. Desse modo, foi calculada a média destes valores em relação aos horários e aos sentidos nos testes, utilizando-se apenas os valores onde existe diferença estatisticamente.

Tabela 9 - Médias das Potências Gerais em Relação aos Horários e Sentidos – Painel Convencional

Painel Convencional								
Dia	Sentido	06:00 - 07:00	08:00 - 09:00	10:00 - 11:00	12:00 - 13:00	14:00 - 15:00	16:00 - 17:00	MÉDIA
1	Oeste a Leste	0,5733	0,5172	0,5856	0,5341	0,5841	0,5516	0,547125
1	Sul a Norte	0,4459	0,5367	0,5268	0,5311	0,5577	0,5585	0,538275
2	Oeste a Leste	0,4768	0,6129	0,5588	0,604	0,5595	0,5362	0,5515
2	Sul a Norte	0,3944	0,5523	0,528	0,5752	0,5786	0,4981	0,5096
3	Oeste a Leste	0,4193	0,5411	0,5238	0,5428	0,5273	0,469	0,503883
3	Sul a Norte	0,3376	0,4754	0,5449	0,5412	0,5343	0,4718	0,47305
4	Oeste a Leste	0,3903	0,477	0,5682	0,5358	0,5198	0,4555	0,47568
4	Sul a Norte	0,4402	0,484	0,5306	0,5722	0,5243	0,5429	0,512967
5	Oeste a Leste	0,3051	0,5081	0,5397	0,4993	0,5328	0,4696	0,475767
5	Sul a Norte	0,3276	0,504	0,5178	0,529	0,59	0,4387	0,47562
	MÉDIA	0,362383333	0,510644444	0,539555556	0,536383333	0,541142857	0,49715	

Fonte: O Autor

Tabela 10 - Médias das Potências Gerais em Relação aos Horários e Sentidos – Seguidor Solar

Seguidor Solar								
Dia	Sentido	06:00 - 07:00	08:00 - 09:00	10:00 - 11:00	12:00 - 13:00	14:00 - 15:00	16:00 - 17:00	MÉDIA
1	Oeste a Leste	0,6062	0,6038	0,735	0,617	0,6018	0,6533	0,652275
1	Sul a Norte	0,4741	0,5888	0,5634	0,6389	0,5319	0,6068	0,599475
2	Oeste a Leste	0,4964	0,6859	0,7359	0,6243	0,6707	0,6562	0,6876
2	Sul a Norte	0,4859	0,7768	0,5764	0,6217	0,5919	0,5392	0,6
3	Oeste a Leste	0,4936	0,6798	0,5907	0,6338	0,6468	0,5651	0,601633
3	Sul a Norte	0,3876	0,5752	0,6041	0,5882	0,608	0,5044	0,543725
4	Oeste a Leste	0,4422	0,5622	0,6364	0,5842	0,616	0,6166	0,56424
4	Sul a Norte	0,4846	0,5517	0,603	0,5973	0,5774	0,5603	0,577367
5	Oeste a Leste	0,4151	0,5989	0,6471	0,6507	0,623	0,5939	0,588117
5	Sul a Norte	0,3749	0,5593	0,5975	0,5648	0,6835	0,5168	0,5464
	MÉDIA	0,433216667	0,610722222	0,628122222	0,624383333	0,6322	0,5934875	

Fonte: O Autor

Pode-se observar, através das Tabelas 9 e 10 que apenas no dia 4 foi percebida uma maior eficiência energética no sentido de sul a norte, tanto utilizando Painel Convencional quanto utilizando Seguidor Solar, podendo-se afirmar que os experimentos foram mais bem sucedidos, do ponto de vista de resultados, no sentido de oeste a leste, de maneira geral. O motivo disso pode ser pelo fato de ocorrência de sombras nas ruas onde foi feita a coleta de Sul a Norte.

Finalmente, é possível se afirmar também que o Seguidor Solar apresenta um ganho geral expressivo em todos os horários, sendo a configuração que ofereceu uma maior eficiência energética geral, como representado graficamente na Figura 26, onde os horários 1, 2, 3, 4, 5 e 6 se referem aos horários de 06:00 às 07:00, 08:00 às 09:00, 10:00 às 11:00, 12:00 às 13:00, 14:00 às 15:00 e 16:00 às 17:00, respectivamente.

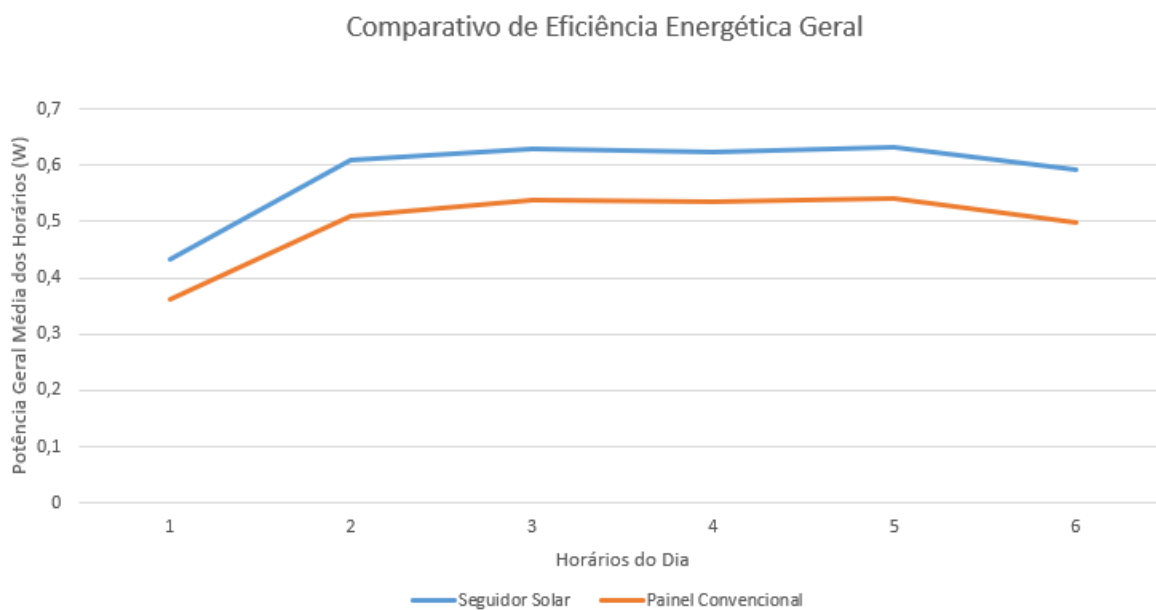


Figura 26: Comparativo de Eficiência Energética Geral

Fonte: O Autor

### 3.2.2.3 Segunda Bateria de Testes Oficiais (Com MPPT)

Visando uma melhora pontual no sistema, foi integrado um Controlador MPPT para tentativa de aumento da potência geral do Seguidor Solar. O grande problema dele, conforme anteriormente citado, é ser dependente do fornecimento da tensão proveniente do Conversor DC-DC que não acontece para valores percebidos inferiores a 3V.

Sendo assim, o sistema adotado no Protótipo nesta etapa de testes oficiais é baseado no da Primeira Bateria de Testes Oficiais, com a diferença de que a nova montagem realiza uma alternância entre os dispositivos carregadores de bateria CN3791 (MPPT) e o CN3065 (Sem MPPT) após o algoritmo realizar a análise sobre qual é o maior valor de tensão percebido pelos sensores de tensão e utilizar o valor de corrente associado a ele, pelo sensor de corrente nele conectado, para cálculo da maior potência naquele momento.

#### 3.2.2.3.1 Análises da Coleta dos Dados

Para tal abordagem, foram incluídos mais um sensor de corrente e um sensor de tensão além dos empregados anteriormente. Porém, foi percebida durante os testes a ocorrência de

uma queda de tensão que o Conversor DC-DC provoca no sistema, que acaba por influenciar na otimização dos resultados obtidos na etapa anterior. Ou seja, a queda de tensão percebida nos Testes Preliminares acaba por influenciar no ponto de entrada do Conversor DC-DC, que é o mesmo ponto de entrada do CN3065, fazendo este carregador trabalhar com uma tensão mais baixa, proveniente do painel, e afetando nos seus resultados.

Nos testes realizados foi percebido o nível de máxima potência proveniente do MPPT com tensão entre 4,5V e 5,5V ao longo de todo percurso ensolarado e, em percurso com a ocorrência de sombras e/ou tempo nublado o nível foi abaixo do percebido Painel Convencional em maior parte do tempo em um nível de tensão aproximado de 2,5V.

Os testes se dividiram em dois cenários: o primeiro com a regulação do Painel Convencional em 19° em direção ao norte (Almeida, 2016) e um segundo com ele livre de ajustes, como estaria empregado em campo, ambos sendo comparados com o Seguidor Solar MPPT.

Ou seja, no primeiro cenário foi feito o ajuste do painel, conforme a literatura, na angulação de latitude antes da coleta em cada sentido, enquanto no segundo não houve ajustes, mantendo o painel no mesmo estado inicial em ambos os sentidos.

Os dias utilizados para os testes foram 30 de Abril de 2022; 01, 02, 07 e 08 de Maio de 2022, com, aproximadamente, 25 pontos de coleta dos dados referentes a tensão e corrente que calculam pelo código os dados de potência, relacionados ao tempo real. A velocidade média e as distâncias percorridas permaneceram as mesmas da Primeira Bateria de Testes Oficiais.

#### **3.2.2.3.1.1 Análise das Médias**

A partir dos dados coletados a cada 11 segundos, foi feita a média entre todos eles e criada a Tabela 11, que demonstra as médias dos valores medidos em campo ao longo dos 5 dias em 30 testes.

O tempo de coleta foi aumentado com relação à bateria de testes anterior (6 segundos) com o intuito de perceber-se a ocorrência do estabelecimento do ponto de máxima potência, além do fato de que, como são dois cenários, os experimentos precisavam se enquadrar dentro da faixa de horário com um volume de dados aproximado, para tratamento dos mesmos.

Desse modo, caso os valores fornecidos pelo segundo cenário fossem iguais ou com mínima diferença, se poderia afirmar com mais certeza que aquele é o ponto que o dispositivo MPPT identificou como o de potência máxima.

Tabela 11 - Tabela de Médias da Segunda Bateria de Testes

			Tabela de Médias da Segunda Bateria de Testes												
			Cenário 1						Cenário 2						
			Painel Convencional (19°)			Seguidor com MPPT			Painel Convencional Livre			Seguidor com MPPT			
Horário	Teste	Sentido	Valor médio de tensão (V)	Valor médio de corrente (A)	Valor médio de potência (W)	Valor médio de tensão (V)	Valor médio de corrente (A)	Valor médio de potência (W)	Valor médio de tensão (V)	Valor médio de corrente (A)	Valor médio de potência (W)	Valor médio de tensão (V)	Valor médio de corrente (A)	Valor médio de potência (W)	
D i a  1	06:00 - 07:00	0 1	O->L	4,02	0,14	0,58	4,15	0,11	0,46	4,54	0,11	0,50	4,92	0,11	0,54
			S->N	3,67	0,09	0,35	2,95	0,14	0,40	3,99	0,13	0,49	2,90	0,13	0,43
	08:00 - 09:00	0 2	O->L	4,69	0,12	0,55	4,81	0,13	0,65	4,65	0,10	0,47	4,87	0,13	0,64
			S->N	4,54	0,11	0,48	4,97	0,12	0,59	4,57	0,11	0,48	4,45	0,13	0,57
	10:00 - 11:00	0 3	O->L	4,68	0,11	0,51	4,93	0,13	0,64	4,61	0,12	0,54	4,97	0,13	0,63
			S->N	4,63	0,11	0,52	5,00	0,12	0,62	4,56	0,11	0,51	4,97	0,12	0,58
	12:00 - 13:00	0 4	O->L	4,96	0,11	0,53	5,09	0,13	0,65	4,60	0,12	0,53	5,00	0,13	0,64
			S->N	4,77	0,11	0,54	4,98	0,12	0,59	4,72	0,11	0,53	4,95	0,12	0,60
	14:00 - 15:00	0 5	O->L	4,64	0,12	0,56	4,93	0,13	0,63	4,48	0,13	0,56	4,98	0,13	0,66
			S->N	4,60	0,12	0,55	4,94	0,13	0,65	4,72	0,12	0,57	4,40	0,12	0,55
	16:00 - 17:00	0 6	O->L	4,31	0,11	0,46	4,12	0,13	0,52	3,82	0,11	0,42	2,92	0,13	0,37
			S->N	3,69	0,11	0,40	3,02	0,12	0,36	3,84	0,11	0,42	2,60	0,11	0,29
D i a  2	06:00 - 07:00	0 7	O->L	4,59	0,10	0,47	5,08	0,12	0,62	4,44	0,11	0,47	5,11	0,13	0,63
			S->N	4,48	0,10	0,45	4,52	0,11	0,48	4,52	0,11	0,49	3,80	0,12	0,44
	08:00 - 09:00	0 8	O->L	4,87	0,11	0,52	5,07	0,14	0,69	4,61	0,11	0,49	5,01	0,12	0,62
			S->N	4,63	0,10	0,49	4,82	0,11	0,55	4,50	0,12	0,53	4,74	0,12	0,57
	10:00 - 11:00	0 9	O->L	4,67	0,11	0,52	5,08	0,14	0,70	4,66	0,12	0,55	5,05	0,13	0,66
			S->N	4,62	0,11	0,52	4,96	0,14	0,71	4,68	0,13	0,63	4,85	0,13	0,61
		0 10	O->L	4,63	0,12	0,55	4,97	0,14	0,69	4,67	0,13	0,59	5,02	0,14	0,70

			12:00 - 13:00		S->N	4,65	0,12	0,58	4,98	0,14	0,67	4,63	0,13	0,61	4,96	0,14	0,69	
			14:00 - 15:00	11	O->L	4,72	0,12	0,57	4,91	0,13	0,66	4,61	0,12	0,57	4,99	0,15	0,72	
					S->N	4,73	0,11	0,54	4,98	0,13	0,64	4,67	0,12	0,55	4,74	0,13	0,60	
			16:00 - 17:00	12	O->L	4,01	0,11	0,44	3,17	0,13	0,41	3,27	0,14	0,45	2,92	0,15	0,43	
					S->N	3,61	0,11	0,40	2,81	0,12	0,34	3,36	0,11	0,36	2,65	0,11	0,30	
D i a  3			06:00 - 07:00	13	O->L	4,63	0,11	0,51	4,71	0,11	0,53	4,44	0,11	0,48	5,30	0,11	0,58	
					S->N	4,08	0,11	0,45	3,81	0,12	0,47	4,16	0,10	0,43	4,24	0,11	0,47	
				08:00 - 09:00	14	O->L	4,69	0,10	0,48	4,92	0,12	0,57	4,60	0,11	0,51	5,31	0,12	0,63
						S->N	4,45	0,10	0,44	4,30	0,11	0,47	4,58	0,12	0,54	5,48	0,13	0,69
				10:00 - 11:00	15	O->L	4,88	0,12	0,59	5,31	0,12	0,66	4,67	0,11	0,53	5,11	0,13	0,68
						S->N	4,58	0,11	0,51	5,17	0,12	0,61	4,61	0,11	0,53	5,24	0,13	0,65
				12:00 - 13:00	16	O->L	5,01	0,13	0,64	5,37	0,13	0,68	4,72	0,12	0,57	5,22	0,13	0,66
						S->N	5,04	0,12	0,62	5,15	0,14	0,70	4,79	0,12	0,55	5,16	0,13	0,65
				14:00 - 15:00	17	O->L	4,74	0,12	0,58	5,16	0,14	0,70	4,64	0,12	0,54	5,12	0,13	0,68
						S->N	5,28	0,12	0,63	5,45	0,14	0,75	5,18	0,13	0,66	4,67	0,14	0,65
				16:00 - 17:00	18	O->L	4,43	0,12	0,54	4,81	0,14	0,64	3,81	0,11	0,41	3,27	0,11	0,37
						S->N	3,90	0,10	0,40	3,18	0,13	0,41	3,40	0,10	0,35	2,69	0,11	0,31
	D i a  4			06:00 - 07:00	19	O->L	4,58	0,10	0,47	4,96	0,13	0,64	4,78	0,10	0,50	5,04	0,10	0,51
						S->N	4,11	0,10	0,41	3,88	0,12	0,48	4,55	0,10	0,47	4,37	0,10	0,46
				08:00 - 09:00	20	O->L	4,88	0,11	0,53	4,92	0,10	0,51	4,71	0,11	0,53	5,08	0,12	0,61
						S->N	4,63	0,11	0,49	4,97	0,12	0,58	4,62	0,11	0,49	4,94	0,11	0,55
				10:00 - 11:00	21	O->L	4,67	0,10	0,48	5,05	0,11	0,54	4,89	0,10	0,50	5,13	0,11	0,57
						S->N	4,67	0,11	0,53	5,02	0,12	0,59	4,61	0,11	0,51	5,03	0,14	0,69
				12:00 - 13:00	22	O->L	4,83	0,13	0,61	5,11	0,16	0,81	4,97	0,12	0,57	5,10	0,11	0,53
						S->N	4,72	0,11	0,51	5,06	0,13	0,63	4,83	0,12	0,59	5,05	0,12	0,62
				14:00 - 15:00	23	O->L	4,90	0,12	0,57	5,27	0,13	0,67	4,96	0,11	0,56	5,07	0,14	0,71
						S->N	4,86	0,11	0,55	5,06	0,12	0,61	4,74	0,11	0,52	4,75	0,11	0,54
				16:00 - 17:00	24	O->L	4,61	0,11	0,50	4,88	0,12	0,59	4,19	0,10	0,44	4,35	0,13	0,55
						S->N	4,26	0,12	0,49	4,13	0,12	0,50	3,58	0,10	0,35	3,00	0,11	0,33
					25	O->L	4,66	0,10	0,47	5,42	0,12	0,63	4,75	0,11	0,50	5,28	0,12	0,62

D i a  5	06:00 - 07:00		S->N	3,97	0,10	0,39	4,44	0,14	0,61	3,16	0,11	0,34	3,91	0,11	0,41	
	08:00 - 09:00	26	O->L	4,96	0,11	0,56	5,22	0,12	0,63	4,72	0,11	0,49	5,34	0,12	0,65	
			S->N	4,71	0,12	0,56	5,24	0,15	0,76	4,67	0,10	0,47	5,18	0,12	0,62	
	10:00 - 11:00	27	O->L	4,95	0,11	0,53	5,32	0,12	0,63	5,01	0,11	0,54	5,19	0,12	0,62	
			S->N	4,70	0,10	0,49	5,17	0,12	0,61	5,28	0,11	0,57	5,01	0,12	0,59	
	12:00 - 13:00	28	O->L	4,48	0,11	0,48	5,21	0,13	0,69	4,89	0,11	0,55	4,93	0,13	0,63	
			S->N	4,71	0,11	0,54	5,08	0,13	0,68	4,72	0,12	0,58	5,14	0,14	0,70	
	14:00 - 15:00	29	O->L	4,69	0,12	0,55	5,11	0,12	0,63	4,77	0,11	0,53	5,10	0,12	0,61	
			S->N	4,99	0,12	0,59	5,05	0,13	0,67	4,74	0,13	0,62	5,12	0,11	0,55	
	16:00 - 17:00	30	O->L	4,69	0,10	0,50	4,99	0,13	0,66	4,50	0,10	0,46	4,89	0,12	0,57	
			S->N	4,66	0,13	0,62	4,21	0,13	0,56	3,76	0,10	0,39	2,85	0,11	0,32	
	<b>MÉDIA DAS MÉDIAS</b>				<b>4,58</b>	<b>0,11</b>	<b>0,51</b>	<b>4,76</b>	<b>0,13</b>	<b>0,60</b>	<b>4,50</b>	<b>0,11</b>	<b>0,51</b>	<b>4,62</b>	<b>0,12</b>	<b>0,57</b>

Fonte: O Autor

Os testes realizados foram bem sucedidos. No entanto, os resultados nesta aplicação se mostraram abaixo do esperado. Devido à queda de tensão observada, os valores de tensão caíram muito, fazendo com que o ganho diário aparente de potência também se tornasse reduzido.

Realizando o Método de Média das Médias, foi possível observar que o ganho geral aparente de potência do Seguidor Solar MPPT em relação ao Painel Convencional, em suas duas configurações, seria menor que o observado na bateria de testes anterior em ambos cenários (17,65% para o Cenário 1 e 11,76% para o Cenário 2), sinalizando uma eficiência menor desta estratégia que na da Primeira Bateria de Testes.

Para verificação desta afirmação, faz-se necessária uma análise estatística, análoga à anterior, de modo a perceber quais dos valores utilizados possuem diferença estatisticamente e considerá-los como objeto de estudo.

### 3.2.2.3.1.2 Testes Estatísticos e Análise Percentual

Na realização dos Testes Estatísticos, foi feita uma análise similar à da Primeira Bateria de Testes, utilizando os testes T-test, Anova e Ranksum. Desse modo, foi desenvolvida a Tabela



12, na qual as informações estão dispostas da mesma maneira que na referente aos testes estatísticos da fase anterior de testes.

Em vermelho, estão demonstrados os experimentos cujas amostras não obtiveram diferença estatisticamente quando comparadas as abordagens referentes ao Painel Convencional e Seguidor com MPPT, enquanto, em verde, o oposto. Nesta Segunda Bateria de Testes foram trabalhados dois Cenários, ambos demonstrados na tabela abaixo.

Tabela 12 - Testes Estatísticos e Análise Percentual da Segunda Bateria de Testes

Dia	Teste	Cenário	Sentido	T-test	P-valor	Anova	P-valor	Ranksum	P-valor	Média PC	Média PS	Mediana PC	Mediana OS	Ganho Percentual (%)	Horários
1	1	1	Oeste a Leste		0,3887		0,3897		0,0373	0,5797	0,4647	0,4	0,48	-19,83784716	06:00 - 07:00
1	1	1	Sul a Norte		0,0001		0,1583		0,5453	0,3471	0,4048	0,34	0,36	16,62345145	
1	1	2	Oeste a Leste		0,0433		0,0621		0,0422	0,4964	0,5364	0,49	0,54	8,058017728	06:00 - 07:00
1	1	2	Sul a Norte		0,073		0,283		0,0261	0,49	0,4265	0,45	0,34	-12,95918367	
1	2	1	Oeste a Leste		0,0027		0,0326		0,0037	0,5467	0,6437	0,51	0,61	17,74282056	08:00 - 09:00
1	2	1	Sul a Norte		0		0		0	0,4772	0,5852	0,48	0,59	22,63202012	
1	2	2	Oeste a Leste		0		0		0	0,478	0,6793	0,48	0,605	42,11297071	
1	2	2	Sul a Norte		0		0,0052		0,0019	0,478	0,571	0,47	0,565	19,45606695	10:00 - 11:00
1	3	1	Oeste a Leste		0		0,0001		0	0,509	0,635	0,525	0,605	24,75442043	
1	3	1	Sul a Norte		0		0		0	0,5178	0,6766	0,515	0,625	30,66821166	
1	3	2	Oeste a Leste		0		0,0073		0,0053	0,535	0,6294	0,515	0,61	17,64485981	10:00 - 11:00
1	3	2	Sul a Norte		0		0		0	0,4995	0,5791	0,505	0,57	15,93593594	
1	4	1	Oeste a Leste		0		0,0004		0,0002	0,5322	0,6517	0,54	0,61	22,45396467	12:00 - 13:00
1	4	1	Sul a Norte		0		0,0025		0,003	0,5378	0,5911	0,54	0,6	9,91074749	
1	4	2	Oeste a Leste		0		0		0	0,527	0,642	0,53	0,64	21,82163188	
1	4	2	Sul a Norte		0,0001		0,0008		0,0012	0,5345	0,6005	0,535	0,59	12,34798877	
1	5	1	Oeste a Leste		0		0,0003		0	0,5588	0,627	0,54	0,64	12,20472441	14:00 - 15:00
1	5	1	Sul a Norte		0		0		0	0,5496	0,6474	0,55	0,65	17,79475983	
1	5	2	Oeste a Leste		0,002		0,0043		0,002	0,5628	0,6589	0,535	0,64	17,0753376	
1	5	2	Sul a Norte		0,1267		0,2432		0,2739	0,5733	0,5475	0,565	0,525	-4,500261643	16:00 - 17:00
1	6	1	Oeste a Leste		0		0,1193		0,3725	0,4595	0,5242	0,46	0,55	14,08052231	
1	6	1	Sul a Norte		0,0113		0,0762		0,0277	0,3952	0,3587	0,4	0,34	-9,23582996	
1	6	2	Oeste a Leste		0,0046		0,1276		0,001	0,4239	0,3678	0,42	0,32	-13,23425336	16:00 - 17:00
1	6	2	Sul a Norte		0		0		0	0,4213	0,323	0,42	0,31	-23,33254213	
2	7	1	Oeste a Leste		0		0,0001		0	0,4718	0,6235	0,47	0,58	32,15345485	06:00 - 07:00
2	7	1	Sul a Norte		0,1228		0,2736		0,1545	0,45	0,4824	0,42	0,49	7,2	
2	7	2	Oeste a Leste		0		0		0	0,474	0,6345	0,46	0,62	33,86075949	
2	7	2	Sul a Norte		0,0737		0,1362		0,208	0,4892	0,4438	0,48	0,46	-9,28045789	
2	8	1	Oeste a Leste		0		0		0	0,521	0,687	0,52	0,67	31,86180422	08:00 - 09:00
2	8	1	Sul a Norte		0		0,0081		0,0004	0,4863	0,5463	0,5	0,57	12,33806292	
2	8	2	Oeste a Leste		0		0		0	0,4942	0,6168	0,49	0,61	24,80777013	
2	8	2	Sul a Norte		0,1848		0,3939		0,469	0,5265	0,57	0,47	0,6	8,262108262	10:00 - 11:00
2	9	1	Oeste a Leste		0		0		0	0,5186	0,7028	0,51	0,65	35,5187042	
2	9	1	Sul a Norte		0		0,0004		0	0,5488	0,6996	0,55	0,64	27,47813411	
2	9	2	Oeste a Leste		0		0		0	0,5478	0,6589	0,53	0,645	20,2811245	
2	9	2	Sul a Norte		0,0187		0,0511		0,0083	0,5747	0,6429	0,53	0,63	11,86706108	12:00 - 13:00
2	10	1	Oeste a Leste		0		0		0	0,5538	0,6895	0,56	0,67	24,50343084	
2	10	1	Sul a Norte		0		0,0017		0,0004	0,575	0,6705	0,565	0,64	16,60869565	
2	10	2	Oeste a Leste		0		0		0	0,5869	0,7038	0,56	0,705	19,91821435	
2	10	2	Sul a Norte		0,0122		0,0782		0,005	0,6052	0,6857	0,57	0,64	13,30138797	14:00 - 15:00
2	11	1	Oeste a Leste		0		0,0002		0,001	0,5671	0,6557	0,56	0,67	15,62334685	
2	11	1	Sul a Norte		0		0		0	0,544	0,6384	0,53	0,64	17,35294118	
2	11	2	Oeste a Leste		0		0		0	0,5673	0,7227	0,575	0,7	27,3929138	16:00 - 17:00
2	11	2	Sul a Norte		0,0007		0,0066		0,0075	0,55	0,5991	0,54	0,61	8,927272727	
2	12	1	Oeste a Leste		0,0023		0,0896		0,0816	0,4423	0,4095	0,44	0,385	-7,415781144	16:00 - 17:00
2	12	1	Sul a Norte		0		0,0031		0,0023	0,3986	0,3419	0,4	0,31	-14,22478675	
2	12	2	Oeste a Leste		0,2406		0,6068		0,1052	0,448	0,4267	0,44	0,4	-4,754464286	
2	12	2	Sul a Norte		0		0		0	0,3622	0,3147	0,37	0,3	-13,11430149	

3	13	1	Oeste a Leste		0,4094		0,5359		0,1049	0,5095	0,5282	0,485	0,54	3,670264966	
3	13	1	Sul a Norte		0,5446		0,8108		0,3608	0,4541	0,4694	0,45	0,37	3,369301916	
3	13	2	Oeste a Leste		0,0002		0,0034		0,0022	0,4788	0,5775	0,455	0,56	20,61403509	06:00 - 07:00
3	13	2	Sul a Norte		0,0003		0,1474		0,226	0,4305	0,4695	0,43	0,465	9,059233449	
3	14	1	Oeste a Leste		0		0,0048		0,0015	0,4774	0,5713	0,47	0,58	19,66904064	
3	14	1	Sul a Norte		0,0018		0,2954		0,5968	0,4371	0,4667	0,43	0,47	6,771905742	08:00 - 09:00
3	14	2	Oeste a Leste		0,0001		0,0001		0,0007	0,51	0,6294	0,495	0,63	23,41176471	
3	14	2	Sul a Norte		0,0066		0,0159		0,0089	0,5762	0,7062	0,53	0,66	22,56161055	
3	15	1	Oeste a Leste		0,0031		0,011		0,0011	0,5934	0,6562	0,56	0,66	10,58308055	
3	15	1	Sul a Norte		0		0		0	0,5121	0,6154	0,52	0,62	20,17184144	10:00 - 11:00
3	15	2	Oeste a Leste		0		0,0345		0,0007	0,5336	0,6793	0,535	0,615	27,30509745	
3	15	2	Sul a Norte		0,0084		0,2115		0	0,5724	0,7724	0,51	0,64	34,94060098	
3	16	1	Oeste a Leste		0,3294		0,3513		0,0005	0,6433	0,6773	0,61	0,68	5,28524794	
3	16	1	Sul a Norte		0		0,0043		0,0004	0,6214	0,6959	0,62	0,675	11,98905697	
3	16	2	Oeste a Leste		0		0		0	0,5736	0,6586	0,57	0,66	14,81868898	12:00 - 13:00
3	16	2	Sul a Norte		0		0		0	0,5507	0,6526	0,55	0,66	18,50372253	
3	17	1	Oeste a Leste		0		0,0003		0,0005	0,5823	0,7005	0,59	0,705	20,29881504	
3	17	1	Sul a Norte		0		0		0	0,6335	0,747	0,64	0,75	17,91633781	
3	17	2	Oeste a Leste		0		0		0	0,5405	0,6827	0,54	0,665	26,30897317	14:00 - 15:00
3	17	2	Sul a Norte		0,696		0,8063		0,655	0,655	0,645	0,655	0,635	-1,526717557	
3	18	1	Oeste a Leste		0		0,0057		0,0028	0,537	0,6385	0,52	0,625	18,90130354	
3	18	1	Sul a Norte		0,736		0,9098		0,1252	0,402	0,4065	0,385	0,35	1,119402985	16:00 - 17:00
3	18	2	Oeste a Leste		0,0081		0,2349		0,0272	0,41	0,3726	0,41	0,31	-9,12195122	
3	18	2	Sul a Norte		0		0		0	0,3621	0,3067	0,365	0,31	-15,29964098	
4	19	1	Oeste a Leste		0		0		0	0,4704	0,6396	0,45	0,61	35,96938776	
4	19	1	Sul a Norte		0		0,0038		0,0072	0,4062	0,4764	0,43	0,46	17,28212703	06:00 - 07:00
4	19	2	Oeste a Leste		0,3331		0,4985		0,2478	0,4957	0,5052	0,5	0,51	1,916481743	
4	19	2	Sul a Norte		0,1928		0,3878		0,6214	0,4591	0,4423	0,455	0,43	-3,659333479	
4	20	1	Oeste a Leste		0,0288		0,3203		0,0776	0,5345	0,5145	0,535	0,49	-3,74181478	
4	20	1	Sul a Norte		0		0		0	0,4895	0,5826	0,49	0,59	19,01940756	08:00 - 09:00
4	20	2	Oeste a Leste		0,0014		0,0029		0,0028	0,5288	0,6076	0,51	0,61	14,90166415	
4	20	2	Sul a Norte		0		0,0001		0,0001	0,4896	0,5492	0,49	0,56	12,17320261	
4	21	1	Oeste a Leste		0		0		0	0,4785	0,5437	0,47	0,54	13,62591432	
4	21	1	Sul a Norte		0,0003		0,0019		0,0006	0,5257	0,5929	0,5	0,59	12,78295606	10:00 - 11:00
4	21	2	Oeste a Leste		0		0,0017		0,0024	0,5028	0,5739	0,5	0,55	14,14081146	
4	21	2	Sul a Norte		0		0,0003		0	0,5031	0,6762	0,5	0,62	34,40667859	
4	22	1	Oeste a Leste		0		0		0	0,6106	0,8053	0,59	0,81	31,88666885	
4	22	1	Sul a Norte		0		0		0	0,5114	0,6295	0,5	0,62	23,09346891	12:00 - 13:00
4	22	2	Oeste a Leste		0,0065		0,1728		0,0434	0,574	0,5332	0,57	0,49	-7,108013937	
4	22	2	Sul a Norte		0,1889		0,2156		0,0118	0,5879	0,6184	0,57	0,62	5,187957136	
4	23	1	Oeste a Leste		0		0,0001		0	0,5652	0,669	0,56	0,65	18,36518047	
4	23	1	Sul a Norte		0,0008		0,0387		0,0525	0,5541	0,6086	0,54	0,595	9,835769717	14:00 - 15:00
4	23	2	Oeste a Leste		0		0		0	0,5618	0,7095	0,535	0,695	26,29049484	
4	23	2	Sul a Norte		0,1424		0,3725		0,1623	0,5213	0,5409	0,53	0,57	3,759831191	
4	24	1	Oeste a Leste		0		0,0022		0,0038	0,4957	0,5852	0,5	0,58	18,05527537	
4	24	1	Sul a Norte		0,5913		0,7849		0,9137	0,4935	0,504	0,48	0,485	2,127659574	16:00 - 17:00
4	24	2	Oeste a Leste		0		0,0371		0,2308	0,4405	0,5547	0,43	0,56	25,92508513	
4	24	2	Sul a Norte		0,0001		0,0121		0,0016	0,3623	0,3316	0,36	0,32	-8,473640629	
5	25	1	Oeste a Leste		0		0,0001		0	0,4669	0,6325	0,45	0,6	35,4679803	
5	25	1	Sul a Norte		0		0		0	0,389	0,6067	0,36	0,6	55,96401028	06:00 - 07:00
5	25	2	Oeste a Leste		0		0,0116		0,0048	0,5039	0,615	0,485	0,565	22,0480254	
5	25	2	Sul a Norte		0,0011		0,002		0,0028	0,3414	0,4129	0,33	0,405	20,94317516	
5	26	1	Oeste a Leste		0,0082		0,0191		0,0019	0,5595	0,6305	0,53	0,62	12,6899017	
5	26	1	Sul a Norte		0		0,0011		0,0011	0,5595	0,7584	0,52	0,69	35,54959786	08:00 - 09:00
5	26	2	Oeste a Leste		0		0		0	0,4941	0,6482	0,5	0,63	31,18801862	
5	26	2	Sul a Norte		0		0		0	0,4709	0,6235	0,46	0,61	32,406031	
5	27	1	Oeste a Leste		0		0		0	0,5258	0,6332	0,52	0,63	20,4260175	
5	27	1	Sul a Norte		0		0		0	0,4946	0,6075	0,49	0,62	22,82652649	10:00 - 11:00
5	27	2	Oeste a Leste		0,0015		0,0036		0,0015	0,5417	0,6172	0,53	0,625	13,93760384	
5	27	2	Sul a Norte		0,0279		0,0514		0,0551	0,5626	0,5968	0,57	0,61	6,078919303	
5	28	1	Oeste a Leste		0		0		0	0,4791	0,6864	0,47	0,665	43,26862868	
5	28	1	Sul a Norte		0		0		0	0,5429	0,6762	0,55	0,67	24,5532474	12:00 - 13:00
5	28	2	Oeste a Leste		0		0,0016		0,0056	0,5508	0,6281	0,555	0,625	14,03413217	
5	28	2	Sul a Norte		0		0,0023		0,0015	0,578	0,6993	0,57	0,67	20,98615917	
5	29	1	Oeste a Leste		0,001		0,001		0,0013	0,552	0,626	0,53	0,62	13,4057971	
5	29	1	Sul a Norte		0		0,0007		0,0013	0,5942	0,6708	0,595	0,66	12,8912824	14:00 - 15:00
5	29	2	Oeste a Leste		0		0,0001		0,0003	0,5333	0,6071	0,53	0,61	13,8383649	
5	29	2	Sul a Norte		0		0,0096		0,0047	0,6165	0,5465	0,62	0,5	-11,35442011	
5	30	1	Oeste a Leste		0		0		0	0,4965	0,6605	0,485	0,65	33,03121853	
5	30	1	Sul a Norte		0,0506		0,1354		0,0267	0,6152	0,5562	0,58	0,52	-9,590377113	16:00 - 17:00
5	30	2	Oeste a Leste		0		0,0002		0,0001	0,4642	0,5711	0,46	0,56	23,02886687	
5	30	2	Sul a Norte		0		0		0	0,4033	0,3167	0,4	0,32	-21,472849	

Fonte: O Autor

Após calcular as médias dos valores onde houve diferença estatisticamente, é possível afirmar, com 99% de certeza que os ganhos percentuais percebidos nesta bateria de testes foram de 22,29% para o Cenário 1 e 16,08% para o Cenário 2. Desse modo, mesmo com os problemas

na coleta relatados, o Cenário 1 obteve um resultado ainda melhor que o da Primeira Bateria de Testes. Tais resultados possibilitam afirmar também sobre a influência positiva dos ajustes do Painel Convencional, uma vez que a abordagem na qual eles foram feitos se demonstrou muito mais eficiente.

### 3.2.2.3.1.3 Influência do Carregador MPPT

A respeito do dispositivo MPPT, ele entregou os resultados esperados ao longo dos testes, sendo observado o seu funcionamento seguindo o máximo ponto de potência nos períodos ensolarados, como demonstrado graficamente nas Figuras 27, 28, 29, 30 e 31.

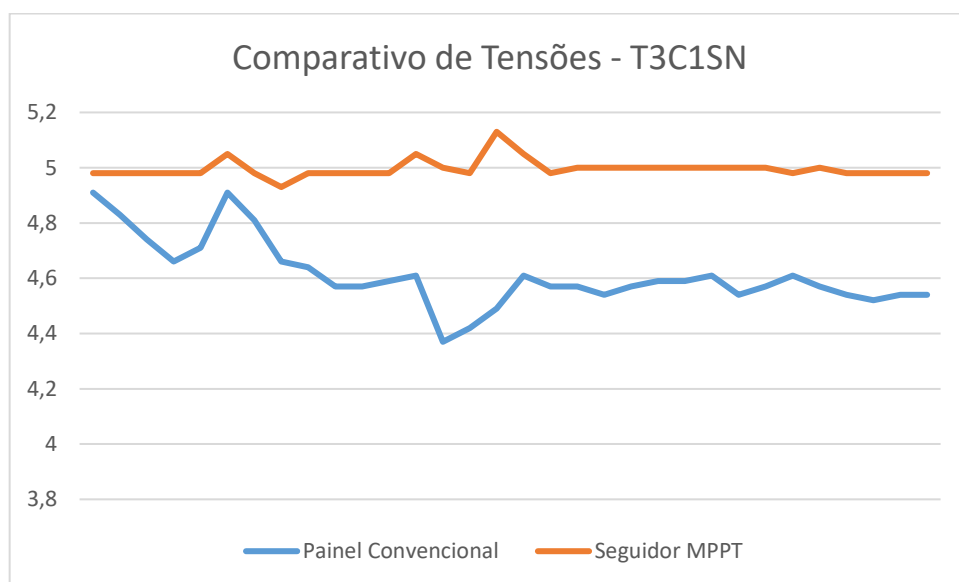


Figura 27: Comparativo de Tensões (V) do Teste 3, Cenário 1, de Sul a Norte

Fonte: O Autor

Este gráfico representa as coletas que foram feitas no dia 1, na faixa de horário das 10:00 às 11:00. É possível perceber a influência da atuação do MPPT, provocando um aumento expressivo da tensão em torno do ponto de 5,0V. As potências percebidas foram de 0,52W para o Painel Convencional e 0,62W para o Seguidor MPPT.

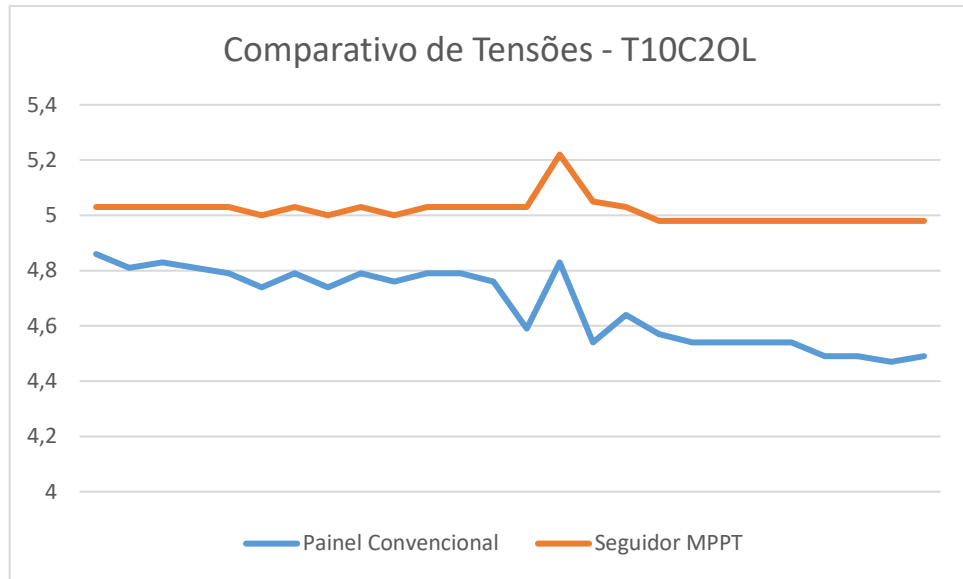


Figura 28: Comparativo de Tensões (V) do Teste 10, Cenário 2, de Oeste a Leste

Fonte: O Autor

Por sua vez, este gráfico representa as coletas que foram realizadas no dia 2, na faixa de horário das 12:00 às 13:00. É perceptível também como o MPPT melhora o sistema, trabalhando em um nível de tensão elevado em relação à curva do Painel Convencional, além de manter este nível em pontos onde a curva do mesmo apresenta queda. As potências percebidas foram de 0,59W para o Painel Convencional e 0,70W para o Seguidor MPPT.

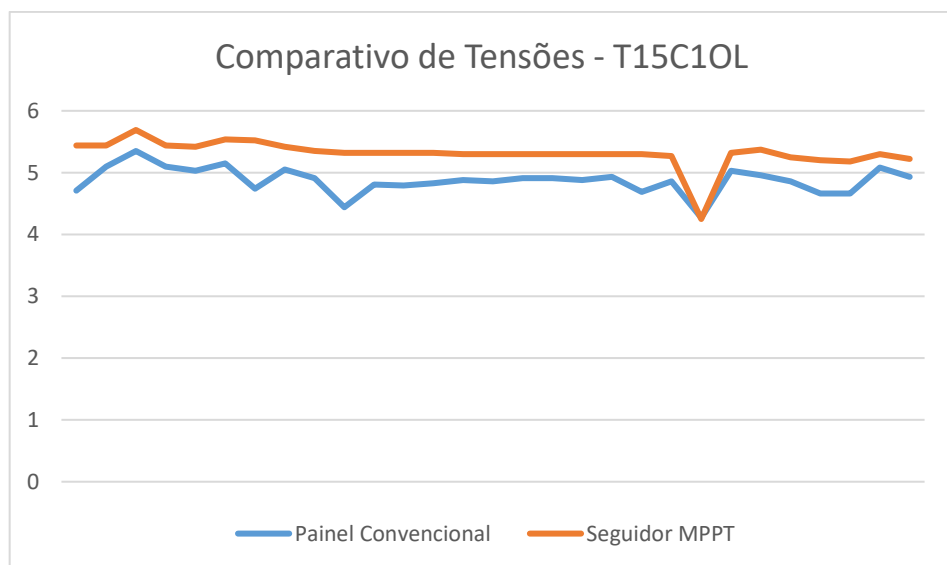


Figura 29: Comparativo de Tensões (V) do Teste 15, Cenário 1, de Oeste a Leste

Fonte: O Autor

Este gráfico representa as coletas que foram feitas no dia 3, na faixa de horário das 10:00 às 11:00. Mesmo com um elevado nível de tensão do Painel Convencional, é possível perceber que o Seguidor MPPT apresenta um melhor resultado ao longo de todo o teste. As potências percebidas foram de 0,59W para o Painel Convencional e 0,66W para o Seguidor MPPT.

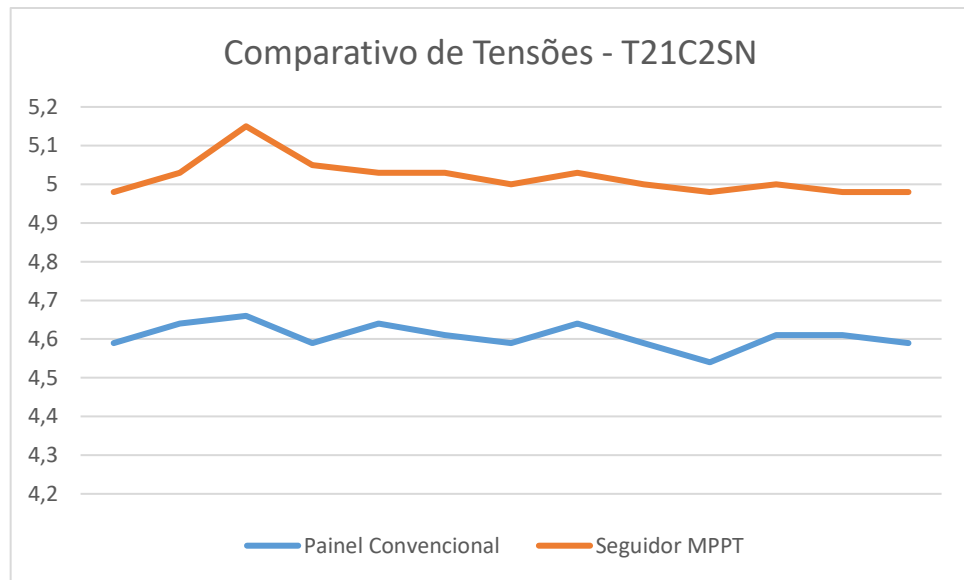


Figura 30: Comparativo de Tensões (V) do Teste 21, Cenário 2, de Sul a Norte

Fonte: O Autor

Já este gráfico representa as coletas que foram feitas no dia 4, na faixa de horário das 10:00 às 11:00. É possível perceber, novamente, a influência da atuação do MPPT, provocando um aumento expressivo da tensão. As potências percebidas foram de 0,51W para o Painel Convencional e 0,69W para o Seguidor MPPT.

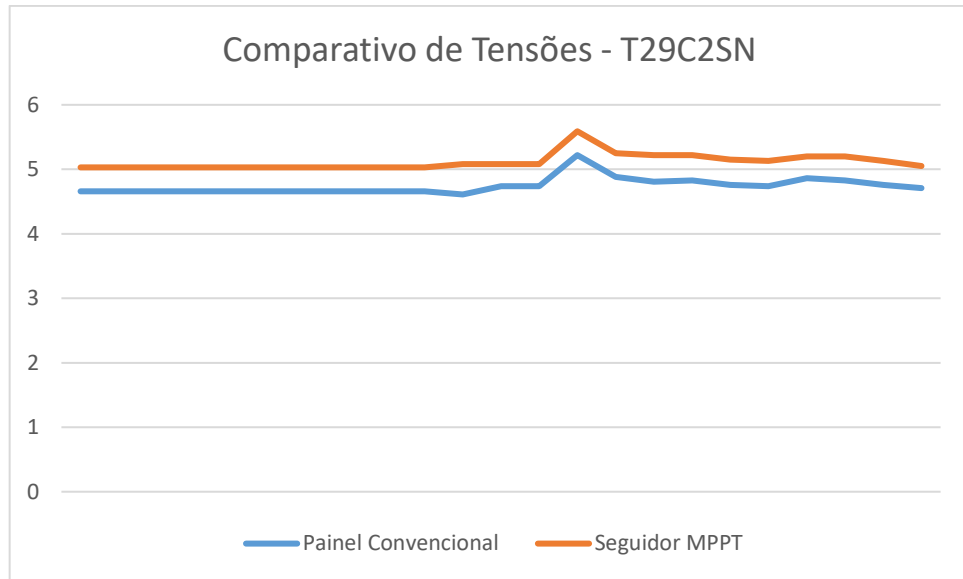


Figura 31: Comparativo de Tensões (V) do Teste 29, Cenário 2, de Sul a Norte

Fonte: O Autor

Finalmente, este gráfico representa as coletas foram feitas no dia 1, na faixa de horário das 10:00 às 11:00. É possível perceber a influência da atuação do MPPT, provocando um aumento expressivo da tensão em torno do ponto de 5,0V. As potências percebidas foram de 0,52W para o Painel Convencional e 0,62W para o Seguidor MPPT.

Desse modo, é possível afirmar, a partir da Segunda Bateria de Testes, que para demonstrar um ganho ainda maior que o alcançado na Primeira Bateria de Testes, é necessário para o protótipo:

1. Que um módulo fotovoltaico de maior potência seja utilizado como objeto de estudo, entregando uma tensão maior que 3V durante todo o tempo e impedindo, assim, que o Conversor DC-DC interrompa a condução de energia.
2. Que cada par de sensores de corrente e tensão tenham a ele associado um painel solar, para que não haja possibilidade de influência do Conversor DC-DC na coleta do carregador CN3095 quando tal conversor não conduzir energia por receber menos que 3,0V. Sendo assim, quando o algoritmo identificar esta ocorrência pela comparação dos valores de potência, utilizará os valores do carregador sem MPPT sem redução.

## **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Em linhas gerais, é possível concluir que os objetivos deste trabalho foram atingidos, uma vez que foram desenvolvidos o planejamento e o protótipo responsáveis pela análise comparativa entre o painel fixo e o seguidor solar. Sendo assim uma alternativa de eficiência energética para o veículo que realiza o diagnóstico de trincas nos dormentes de aço da EFVM, de maneira comprovada.

Como o protótipo desenvolvido foi em menor escala àquele a ser aplicado em campo, o problema gerado pelo Conversor DC-DC não ocorrerá, uma vez que para tal aplicação o Sistema Fotovoltaico será de tensão maior que o ponto crítico de 3V e, conseqüentemente, maior potência que a desenvolvida neste trabalho. Apesar de a segunda bateria de testes não ter entregue os resultados desejados, nela foi possível verificar a atuação bem sucedida do MPPT na sua função de aplicação e a influência do ajuste de angulação dos painéis, observações cruciais para a adaptação deste estudo em campo.

Além disso, é possível analisar a viabilidade energética e econômica empregadas na solução desenvolvida, uma vez que o ganho energético possibilitará um menor gasto energético da carga das baterias empregadas e com um aumento de sua vida útil, o que implica, também, na minimização de problemas ambientais referentes ao descarte inadequado na natureza.

As estratégias desenvolvidas ilustram um caminho seguro para a busca de uma eficiência energética leve, potente e duradoura. Neste sentido, esta seção surge com o intuito de apresentar as contribuições do trabalho, bem como os produtos gerados e a serem gerados, além de sugestões para trabalhos futuros.

### **4.1 Contribuições**

Uma das contribuições do trabalho foi o desenvolvimento da metodologia para aumentar a eficiência energética do veículo autônomo responsável pelo diagnóstico de trincas na EFVM. Neste trabalho demonstram-se estratégias para obtenção do máximo desempenho do sistema fotovoltaico proposto, bem como a oferta de soluções para a autonomia do veículo. Além disso, o trabalho demonstra, também, a sustentabilidade na prática, promovendo sinergia entre a aplicação da ciência e a preservação ambiental.

A utilização da metodologia do projeto desenvolvido no âmbito industrial, mais especificamente na logística inerente a ferrovias, surge como alternativa de aproveitamento da tecnologia em prol da economia, segurança e modernização de estruturas vigentes. Sua aplicação proporcionará ganhos como:

- Aumento da Economia – A logística empregada, com trânsito de um veículo autônomo em proximidade dos dormentes de aço da EFVM, bem como o não uso de combustíveis fósseis por veículos de combustão interna, mas de geração própria de energia elétrica para a mobilidade, oferece uma redução dos custos associados às atividades correlatas (e.g., manutenções corretivas, preventivas);
- Aumento da Segurança – Além de contribuir muito com a segurança da estrada de ferro como um todo através da identificação de possíveis trincas nos dormentes, uma eficiência energética do veículo responsável por esse trabalho traz uma autonomia e sustentabilidade significativos, que garantem segurança da frente de trabalho através da minimização de erros de mobilidade;
- Aumento de produtividade – Uma manutenção mais rápida e eficiente da estrada de ferro promoverá um transporte melhor e mais seguro e uma menor ocorrência de problemas ocasionados pela presença de trincas.

#### **4.2. Produtos Gerados e Produtos a Serem Gerados**

- Um protótipo;
- Uma solução para ser instalada no veículo em desenvolvimento;
- A publicação de pelo menos um artigo em conferência ou revista internacional.



### 4.3 Trabalhos Futuros

Tendo em vista a grande quantidade de conceitos e estratégias possíveis de serem trabalhados, surgem as seguintes propostas de trabalhos futuros que podem incrementar a estrutura e, conseqüentemente, os resultados possíveis deste projeto.

#### 4.3.1 Sistema de Previsão de Geração Energética

É sabido que quanto maior a previsibilidade de um sistema, maior sua confiabilidade. Segundo Kasburg e Stefenon (2019) a Memória Longa de Curto Prazo (LSTM) é uma rede neural artificial que tem seu uso recorrente em *deep learning* com conexões de *feedback* e pode lembrar o estado da rede entre as previsões, sendo uma boa estratégia para previsões em uma série temporal longa.

Os dados adquiridos pelos sensores podem ser analisados dentro de um período de tempo de insolação diário de cerca de 6 horas e durante um determinado número de dias, possibilitando a previsão em tempos futuros, mapeando os tempos da amostra em relação ao tempo e coletando milhares de dados para avaliação.

#### 4.3.2 Simulação Estacionária pelo PVSyst

O PV Syst 7.2 é um software dedicado à gerência de sistemas fotovoltaicos. Através dele é possível obter resultados em relatório abrangente acerca dos parâmetros do sistema. É possível importar e exportar dados e analisá-los a partir da construção de gráficos e tabelas. Como o veículo se encontrará em movimento, a intenção na utilização deste software é simular estados de geração em cada uma das estações da linha férrea.

Através do Atlas Brasileiro de Energia Solar, disponível em [http://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017.html#mod](http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html#mod), site do INPE, é possível obter todos os dados de incidência solar em território nacional em formato CSV. Sendo assim, é possível a utilização da base de dados da Irradiância Global Horizontal para demonstrar um cenário ideal de irradiância mensal e fazer uma análise comparativa com a simulação realizada no PVSyst.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARA, K. et al., "Improved Performance of a PV Solar Panel with Adaptive Neuro Fuzzy Inference System ANFIS based MPPT," *2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Paris, 2018, pp. 1098-1101, doi: 10.1109/ICRERA.2018.8566818.

ALMEIDA, Arthur da Costa; PEREIRA, Carlos Simões; CESAR, Raimundo. **Estudos Para Posicionamento Ótimo de Painéis Fotovoltaicos nas Latitudes Amazônicas.** II Congresso Amazônico de Meio Ambiente e Energias Renováveis, 2016.

BARAN, Renato; LEGEY, Luiz Fernando Loureiro. **Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil.** BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 33, p. 207-224, mar. 2011., 2011.

CONFESSOR, Sâmya Lorena de Medeiros, et al. "Análise comparativa de controladores MPPT aplicados a um sistema fotovoltaico." 2014.

CORTEZ, Ramiro José Monteiro, et al. Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica. 2013.

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica.** Disponível em: <  
[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod\\_resource/content/2/Apostila\\_solar.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf) >.  
Acesso em 30 jan 2021.

KASBURG, Christopher; STEFENON, Stéfano Frizzo. "Deep learning for photovoltaic generation forecast in active solar trackers," *IEEE Latin America Transactions*, 2019, 17.12: 2013-2019.

KULAK, Brendon Vinicius. **“Uso de Supercapacitores Para Armazenamento de Energia em Carros Elétricos.”** *Revista Innovatio*, 2020, 2.

LELIS, Átila Montine Fernandes de. **Sistema de armazenamento híbrido para veículos elétricos.** 2018.

MARTINS, Frederico Osvaldo. **“Seguidor solar de dois eixos com motores passo-a-passo.”** 2016. PhD Thesis.

OGAWA, Vanessa Gomes Cruz. Proposta de identificação dos parâmetros do modelo de bateria para uso na modelagem de sistemas de partida de veículos automotivos. 2011. PhD Thesis. Universidade de São Paulo.

RIBEIRO, Raphael Augusto dos Santos. **Sistemas de energia solar em conjuntos habitacionais com ênfase em sustentabilidade.** 2018.

SHADMAN, M.; RAJ, V. S.; DAVE, R.; PAL, A., **"Hybrid energy storage system containing Bidirectional DC Converter, Battery, Super capacitor, Solar Panel for increasing the performance of Electric Vehicles,"** *2018 Fourth International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB)*, Chennai, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/AEEICB.2018.8480910

SINGH A.; SHIMI, S. L., **"MATLAB / SIMULINK Simulation of PV System Based on MPPT in Variable Irradiance with EV Battery as Load,"** *2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC)*, Coimbatore, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICCIC.2017.8524563

WHAVALE, S. and DHAVALIKAR, "A review of Adaptive solar tracking for performance enhancement of solar power plant," *2018 International Conference on Smart City and Emerging Technology (ICSCET)*, Mumbai, 2018, pp. 1-8, doi: 10.1109/ICSCET.2018.8537352.

## Anexo I – Pseudo-código Utilizado

- Bibliotecas Auxiliares

```
#include <Biblioteca para o RTC DS1302> <Biblioteca dos Servomotores> <Biblioteca de Instância e Passagem de Parâmetros>
```

```
Criação da Instância 1; Criação da Instância 2; //Criação da Instância 3;
```

```
#define clk 19 #define dat 20 #define rst 21
```

- Pinos de conexões dos LDR

```
name = analogpin; int ldrL = 0 (LDR Inferior Esquerdo); int ldrR = 2 (LDR Inferior Direito);
```

```
int ldrLd = 1 (LDR Superior Esquerdo); int ldrRd = 3 (LDR Superior Direito); int c = 0;
```

- Sensores de Corrente

```
#define CORRENTE_CAL 18.40 (o valor referente à calibração precisa ser ajustado em paralelo com um multímetro, para medição da corrente da carga)
```

```
const int pinoSensorC = A5 (pino analógico ao qual o sensor está conectado - sem seguidor);
```

```
const int pinoSensorC1 = A6 (pino analógico ao qual o sensor está conectado - com seguidor);
```

```
//const int pinoSensorC2 = A8 (pino analógico ao qual o sensor está conectado - com seguidor mppt);
```

```
float ruido = 0.08 (ruído na saída do sensor, ajustado após carregamento do código no Arduino, com a carga desligada)
```

- Sensores de Tensão

```
const int pinoSensor = A4 (Sensor sem seguidor); const int pinoSensor1 = A7 (Sensor com seguidor)
```

```
//const int pinoSensor2 = A9 (Sensor com seguidor MPPT);
```

```
float tensaoEntrada = 0.0 (Sem seguidor); float tensaoMedida = 0.0 (Sem seguidor);
```

```
float tensaoEntrada1 = 0.0 (Com seguidor); float tensaoMedida1 = 0.0 (Com seguidor)
```

```
//float tensaoEntrada2 = 0.0 (Com seguidor MPPT); //float tensaoMedida2 = 0.0 (Com seguidor MPPT)
```

```
float valorR1 = 30000.0; float valorR2 = 7500.0;
```

```
int leituraSensorSS = 0 (Sem seguidor); int leituraSensorCS = 0 (Com seguidor);
```

```
//int leituraSensorCSM = 0 (Com seguidor MPPT);
```

- RTC

```
#define segL (valor segundos) #define minL (valor minutos)
```

```
#define horL (valor horas) #define d_semL (valor dia semana)
```

```
#define d_mesL (valor dia mês) #define mesL (valor mês) #define anoL (valor ano)
```

```
virtuabotixRTC myRTC(clk, dat, rst) (declara objeto para o RTC);
```

```
//myRTC.setDS1302Time(segL, minL, horL, d_semL, d_mesL, mesL, anoL);}
```

- Protótipo das Funções

```
void DS1302(); void Tensao(); void week(int dayW); void Corrente();
```

```
void setup() {pinMode(pinoSensor, INPUT); Serial.begin(9600);
```

```
parametro1.corrente(pinoSensorC, CORRENTE_CAL); parametro2.corrente(pinoSensorC1,  
CORRENTE_CAL);
```

```
// parametro3.corrente(pinoSensorC2, CORRENTE_CAL);
```

- Servomotores

```
Servo horizontal; int servoh = 90; int servohLimiteSup = 180; int servohLimiteInferior = 65;
```

```
Servo vertical; int servov = 90; int servovLimiteSup = 120; int servovLimiteInferior = 15;
```

```
horizontal.attach(10); vertical.attach(9); horizontal.write(180); vertical.write(45);delay(3000);
```

```
void loop(){ int lt = analogRead(ldrlt); int rt = analogRead(ldrrt); int ld = analogRead(ldrld); int rd =  
analogRead(ldrrd); int dtime = 10; int tol = 50; int medsup = (-lt - rt) / 2; int medinf = (-ld - rd) / 2; int medesq =  
(-lt - ld) / 2; int meddir = (-rt - rd) / 2; int dvert = medsup - medinf; int dhoriz = medesq - meddir;
```

```
if (-1*tol > dvert || dvert > tol) {if (medsup > medinf) {servov = ++servov;
```

```
if (servov > servovLimiteSup) {servov = servovLimiteSup;}}
```

```
else if (medsup < medinf) {servov = --servov;
```

```
if (servov < servovLimiteInferior){servov = servovLimiteInferior;}} vertical.write(servov);}
```

```
if (-1*tol > dhoriz || dhoriz > tol) {if (medesq > meddir) {servoh = --servoh;
```

```
if (servoh < servohLimiteInferior) {servoh = servohLimiteInferior;}}
```

```
else if (medesq < meddir) {servoh = ++servoh;
```

```
if (servoh > servohLimiteSup) {servoh = servohLimiteSup;}}
```

```
else if (medesq = meddir) { } horizontal.write(servoh);} delay(dtime); c = c + 1;
```

```
if (c == 500) {DS1302(); Potencia(); c = 0;}}
```

```
void DS1302() { myRTC.updateTime(); Serial.print(" "); week(myRTC.dayofweek);
```

```
Serial.print(", "); Serial.print(myRTC.dayofmonth); Serial.print("/");
```

```
Serial.print(myRTC.month); Serial.print("/"); Serial.print(myRTC.year); Serial.print(", ");
```

```
if(myRTC.hours < 10) Serial.print("0"); Serial.print(myRTC.hours); Serial.print(":");
```

```

if(myRTC.minutes < 10) Serial.print("0"); Serial.print(myRTC.minutes); Serial.print(":");

if(myRTC.seconds < 10) Serial.print("0"); Serial.println(myRTC.seconds); Serial.print(" "); delay(10);}

void week(int dayW) {switch(dayW){

    case 1: Serial.print("Dom"); break; case 2: Serial.print("Seg"); break; case 3: Serial.print("Ter"); break; case 4:
Serial.print("Qua"); break; case 5: Serial.print("Qui"); break; case 6: Serial.print("Sex"); break; case 7:
Serial.print("Sab"); break;}}

void Potencia() {leituraSensorSS = analogRead(pinoSensor); tensaoEntrada = (leituraSensorSS * 5.0) / 1024.0;
tensaoMedida = tensaoEntrada / (valorR2/(valorR1+valorR2));

leituraSensorCS = analogRead(pinoSensor1); tensaoEntrada1 = (leituraSensorCS * 5.0) / 1024.0; tensaoMedida1
= tensaoEntrada1 / (valorR2/(valorR1+valorR2));

//leituraSensorCSM= analogRead(pinoSensor2); // tensaoEntrada2 = (leituraSensorCSM * 5.0) / 1024.0;
//tensaoMedida2 = tensaoEntrada2 / (valorR2/(valorR1+valorR2));

tensaoMedida = tensaoMedida; tensaoMedida1 = tensaoMedida1; //tensaoMedida2 = tensaoMedida2;

    Serial.println(" "); Serial.print(tensaoMedida,2); Serial.println(" ");

    Serial.println(" "); Serial.print(tensaoMedida1,2); Serial.println(" "); delay(50);

/* else {Serial.print(Serial.println(" "); Serial.print(tensaoMedida2,2); Serial.println(" ");}*/

parametro1.calcVI(17,100); parametro2.calcVI(17,100); //parametro3.calcVI(17,100);

double correnteValor = parametro1.Irms; double correnteValor1 = parametro2.Irms;

//double correnteValor2 = parametro3.Irms;

correnteValor = (correnteValor-ruido); correnteValor1 = (correnteValor1-ruido); // correnteValor2 =
(correnteValor2-ruido);

if(correnteValor < 0){correnteValor = 0;}

else if(correnteValor1 < 0){correnteValor1 = 0;} //else if(correnteValor2 < 0){correnteValor2 = 0;}

    Serial.println(" "); Serial.print(correnteValor); Serial.println(" "); Serial.println(" ");
Serial.print(correnteValor1); Serial.println(" ");

/*else {Serial.println(" "); Serial.print(correnteValor2); Serial.println(" ");} */

double Pot = tensaoMedida * correnteValor; Pot1 = tensaoMedida1 * correnteValor1;

//double Pot2 = tensaoMedida2 * correnteValor2;

// Serial.println(" "); Serial.print(Pot); Serial.println(" ");

// Serial.println(" "); Serial.print(Pot1); Serial.println(" ");

/*else {Serial.println(" "); Serial.print(Pot2); Serial.println(" ");}*/

```