

Luiz Carlos Lourenço da Silva

**PROJETO DE UM CARACTERIZADOR AUTOMÁTICO DE CURVAS
PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO SISTEMA DE
AQUISIÇÃO DE DADOS ASSISTIDO POR SUPERVISÓRIO**

Itumbiara
Julho de 2019

Luiz Carlos Lourenço da Silva

**PROJETO DE UM CARACTERIZADOR AUTOMÁTICO DE CURVAS
PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO SISTEMA DE
AQUISIÇÃO DE DADOS ASSISTIDO POR SUPERVISÓRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

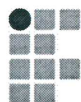
Prof. Ghunter Paulo Viajante, Dr. (IFG) – Orientador

Prof. Eric Nery Chaves, Dr. (IFG)

Prof. Marcelo Escobar de Oliveira, Dr. (IFG)

Itumbiara

Julho de 2019



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS



TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: **LUIZ CARLOS LOURENÇO DA SILVA.**

Matrícula: **20121040070119.**

Título do Trabalho: **PROJETO DE UM CARACTERIZADOR AUTOMÁTICO DE CURVAS PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS ASSISTIDO POR SUPERVISÓRIO.**

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: 01/08/2019

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara, 01/08/2019
Local Data

Luiz Carlos Lourenço da Silva
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



INSTITUTO FEDERAL
GOIÁS
Campus Itumbiara

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
DEPARTAMENTO DE ÁREAS ACADÊMICAS
COORDENAÇÃO DE CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ATA Nº 23 DA DEFESA PÚBLICA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE LUIZ CARLOS LOURENÇO DA SILVA, DISCENTE DO CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DO INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS, CÂMPUS ITUMBIARA.

Aos oito dias do mês de julho de 2019, às 20 horas e trinta minutos, na sala 03, Bloco 100A, do Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos membros: Prof. Dr. GHUNTER PAULO VIAJANTE, do Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara, Prof. Dr. ERIC NERY CHAVES, do Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara e Prof. Dr. MARCELO ESCOBAR DE OLIVEIRA, do Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara, sob a presidência do primeiro, para a arguição pública do Trabalho de Conclusão de Curso de LUIZ CARLOS LOURENÇO DA SILVA, intitulado "PROJETO DE UM CARACTERIZADOR AUTOMÁTICO DE CURVAS PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS ASSISTIDO POR SUPERVISÓRIO". Após a apresentação do trabalho, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão. Em reunião reservada, a Comissão Examinadora deliberou e decidiu pelo conceito final do trabalho: 10 (dez), o qual foi informado formalmente ao estudante e aos presentes na defesa pública. Nada mais havendo, deu-se por encerrada a reunião, na qual foi lavrada, lida e assinada a presente ata, pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. GHUNTER PAULO VIAJANTE
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara


Prof. Dr. ERIC NERY CHAVES
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara


Prof. Dr. MARCELO ESCOBAR DE OLIVEIRA
Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586p

Silva, Luiz Carlos Lourenço da

Projeto de um caracterizador automático de curvas para painéis fotovoltaicos utilizando sistema de aquisição de dados assistido por supervisorio. / Luiz Carlos Lourenço da Silva. -- 2019.

137 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Ghunter Paulo Viajante

1. Energia solar. 2. Geração de energia fotovoltaica. 3. Células solares.
I. Título. II. Ghunter, Paulo Viajante.

CDD: 621.47

Bibliotecário: Eduardo Pereira Resende CRB/1-3266

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, por todo o incentivo, esforço, compreensão e apoio nos momentos de dificuldade, não medindo esforços para a realização dessa conquista.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Luismar Lourenço da Silva e a minha tia/madrinha e mãe Luce Helena Silva, responsáveis pela minha educação e formação de caráter.

A minha irmã Tatiana Aparecida Silva Gonçalves, que me apoiou em vários momentos durante a graduação, me contagiando com a seu otimismo.

A minha filha Maria Eduarda Soares Lourenço, que me proporciona momentos de felicidade aos quais me fazem esquecer qualquer adversidade do dia-a-dia.

Ao meu amigo e primo Higor Lemes Prado, que mesmo em outra cidade, sempre esteve ao meu lado nos momentos difíceis, me aconselhando e apoiando durante a graduação.

A todos os familiares que direta ou indiretamente me apoiaram nesse projeto. Em especial a minha prima Zeugmar Maria Lemes, que disponibilizou seu tempo me aconselhando sobre as dificuldades da graduação e fazendo considerações importantes sobre esse projeto.

A todos os amigos que fiz durante a graduação, Nathan F. Xavier, Leonidio P. da S. Neto, Geovane Souza, Rodrigo G. Silva, Augusto A. P. Campos, em especial ao meu amigo Italo N. Mendonça pela companhia em inúmeras sextas feiras de estudos na biblioteca.

Ao meu amigo e técnico de laboratório Matheus Ferreira Silva, que admiro pelo esforço, dedicação e comprometimento com a graduação, que é uma das pessoas mais responsáveis que eu conheço. Agradeço por ter compartilhado o ambiente de estudo e por todo o aprendizado que obtive ao seu lado.

Ao meu amigo Salim M. M Junior, com quem dividi o laboratório de eletrônica nessa reta final do curso e podemos vencer os obstáculos de um trabalho prático e compartilhar conhecimentos.

Aos professores do IFG – Campus Itumbiara, Claudio R. Pacheco, Rui V. R. da Silva, Erick N. Chaves, Sergio B. da Silva, Hugo X. Rocha, Olívio C. N Souto, em especial ao meu orientador Ghunter P. Viajante, com quem tive a grande oportunidade de ser aluno durante toda a graduação.

“Que Deus não permita que eu perca o ROMANTISMO, mesmo eu sabendo que as rosas não falam.

Que eu não perca o OTIMISMO, mesmo sabendo que o futuro que nos espera não é assim tão alegre.

Que eu não perca a vontade de VIVER, mesmo sabendo que a vida é, em muitos momentos dolorosa...

Que eu não perca a vontade de ter AMIGOS, mesmo sabendo que, com as voltas do mundo, eles acabam indo embora de nossas vidas...

Que eu não perca a vontade de AJUDAR as pessoas, mesmo sabendo que muitas delas são incapazes de ver, reconhecer e retribuir esta ajuda.

Que eu não perca o EQUILÍBRIO, mesmo sabendo que inúmeras forças querem que eu caia.

Que eu não perca a VONTADE de amar, mesmo sabendo que a pessoa que eu mais amo, pode não sentir o mesmo por mim...

Que eu não perca a RAZÃO, mesmo sabendo que as tentações da vida são inúmeras e deliciosas.

Que eu jamais perca o sentimento de JUSTIÇA, mesmo sabendo que o prejudicado possa ser eu.

Que eu não perca o meu forte ABRAÇO, mesmo sabendo que um dia meus braços estarão fracos...

Que eu não perca a BELEZA e a ALEGRIA de ver, mesmo sabendo que muitas lágrimas brotarão dos meus olhos e escorrerão por minha alma...

Que eu não perca o AMOR por minha família, mesmo sabendo que ela muitas vezes me exigiria esforços incríveis para manter sua harmonia.

Que eu não perca a vontade de doar este enorme AMOR que existe em meu coração, mesmo sabendo que muitas vezes ele será submetido e até rejeitado.

Que eu não perca a vontade de ser GRANDE, mesmo sabendo que o mundo é pequeno... E acima de tudo...

Que eu jamais me esqueça que Deus me ama infinitamente, que um pequeno grão de alegria e esperança dentro de cada um é capaz de mudar e transformar qualquer coisa, pois ... a vida é construída nos sonhos e concretizada no amor”

- Nadir Beltrão

RESUMO

A geração de energia fotovoltaica vem crescendo de forma vertiginosa no cenário mundial. No Brasil as políticas públicas têm colaborado para esse crescimento, em especial para a geração distribuída (GD). Esse crescimento justifica o aumento de trabalhos e pesquisas científicas relacionadas ao desenvolvimento de novas tecnologias para a energia solar. Considerando o contexto atual, este projeto propõe a construção de um protótipo de caracterizador de curvas para módulos fotovoltaicos, com o objetivo de obter as curvas características I-V (Corrente x Tensão) e P-V (Potência x Tensão) e compará-las com uma simulação computacional feita a partir de dados obtidos dos próprios fabricantes de células solares. Essa comparação permite validar o modelo matemático utilizado em simulação, através do método de Newton Raphson. A caracterização de módulos fotovoltaicos possibilita analisar a influência das condições climáticas sobre a potência gerada, podendo ser identificados problemas como: sombreamento parcial, sujeira nos módulos e perda na geração devido ao envelhecimento. Dessa forma o protótipo desenvolvido pode ser utilizado para verificar a eficiência de geração de um módulo, assim como para a criação de um banco de dados em diferentes condições climáticas, para comparações futuras, sendo que o circuito empregado neste protótipo tem um baixo custo em relação a modelos comerciais, o que viabiliza a sua aplicação.

Palavras Chaves: Energia Fotovoltaica, Célula Solar, MOSFET, Método de Newton.

ABSTRACT

The generation of photovoltaic energy has been growing a lot in the whole world. In Brazil, public policies have contributed to this growth, especially for distributed generation (GD). This growth justifies the increase of works and scientific researches related to the development of new technologies for solar energy. Considering the current context, this project proposes the construction of a prototype of a curve characterizer for photovoltaic modules, with the objective of obtaining the characteristic curves IV (Current x Voltage) and PV (Power x Voltage) and comparing them with a computational simulation made from data obtained from solar cells manufacturers. This comparison allows to validate the mathematical model used in the simulation, in this case, the Newton Raphson method. The characterization of photovoltaic modules makes possible to analyze the influence of environmental conditions on the generated power, being able to identify problems such as: partial shading, dirt in the modules and loss in generation due to aging. In this way the prototype of this project can be used to verify the generating efficiency of a module, as well as for the creation of a database in different climatic conditions, for future comparisons, being the circuit used in this prototype has a low cost compared to commercial models, that makes it possible to apply them.

Keywords: Photovoltaic energy, Solar cell, MOSFET, Newton method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Coletor Solar Plano	24
Figura 2 – Diferença física entre SAS de circulação Natural e Forçada.	25
Figura 3 – Crescimento anual de geração fotovoltaica no mundo.	27
Figura 4 – Capacidade Solar Fotovoltaica dos principais Países.	28
Figura 5 – Exemplo de SFI suprindo a demanda energética de uma residência.	30
Figura 6 – Exemplo de um SFCR, suprindo a demanda energética de uma residência.	31
Figura 7 – Evolução da Geração Distribuída no Brasil.	32
Figura 8 – Analogia entre degraus de uma escada e a banda proibida (<i>GAP</i>).	33
Figura 9 – Bandas de Energia para materiais sólidos.	33
Figura 10 – Representação esquemática dopagem tipo N.	35
Figura 11 – Representação esquemática da dopagem tipo P.	35
Figura 12 – Zona de depleção junção pn no escuro.	36
Figura 13 – Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.	37
Figura 14 – Diferença entre célula, Módulo, Arranjo ou Pannel fotovoltaico.	38
Figura 15 – Símbolo utilizado para um módulo fotovoltaico.	38
Figura 16 – Associação série de n células fotovoltaicas.	39
Figura 17 – Associação em paralelo de n módulos fotovoltaicos.	39
Figura 18 – Associação mista $n \times m$ módulos fotovoltaicos.	40
Figura 19 – Exemplo de curvas características ideais.	43
Figura 20 – Circuito equivalente completo de uma célula fotovoltaica.	44
Figura 21 – Circuito equivalente da célula com terminais em curto.	46
Figura 22 – Circuito equivalente com os terminais abertos.	47
Figura 23 – Fluxograma para utilização do método de Newton.	49
Figura 24 – Fluxograma para simulação variando irradiação e temperatura.	52
Figura 25 – Exemplo do efeito da variação da irradiação com temperatura CTE.	53
Figura 26 – Exemplo do efeito da variação da temperatura com a irradiação CTE.	53
Figura 27 – Simbologia Usual do Mosfet NMOS.	56
Figura 28 – Regiões de Operação do MOSFET.	56
Figura 29 – Curvas de Operação do MOSFET (em azul) e curva característica de um painel (em vermelho).	59
Figura 30 – Esquema Fonte Simétrica.	61

Figura 31 – Layout Fonte Simétrica.....	61
Figura 32 – Fonte simétrica.....	62
Figura 33 – Entrada de tensão no sensor Hall..	63
Figura 34 – Placa de Condicionamento de Sinais.	64
Figura 35 – Circuito do Estágio de Comando..	66
Figura 36 – Layout do Circuito de Comando.....	66
Figura 37 – Circuito de comando construído..	67
Figura 38 – Circuito de Calibração dos dados de tensão.....	69
Figura 39 – Gráfico obtido com os dados da Tabela 2, utilizando a linha de tendência.	71
Figura 40 – Circuito de Calibração dos dados de corrente.....	73
Figura 41 – Gráfico obtido com os dados da Tabela 3, utilizando linha de tendência.....	76
Figura 42 – Diagrama esquemático do Caracterizador com todos os estágios..	77
Figura 43 – Tempo em microssegundos gasto para imprimir 400 aquisições de tensão e corrente no monitor serial.....	78
Figura 44 – Interface Gráfica Criada no MATLAB.....	79
Figura 45 – Fluxograma do algoritmo utilizado, para a caracterização de um painel fotovoltaico.....	81
Figura 46 – Ensaio com a Fonte de Bancada Simulando um painel fotovoltaico.	83
Figura 47 – Caracterizador Fotovoltaico.....	84
Figura 48 – Ensaio com a fonte de bancada ajustada em 5 Vcc.....	85
Figura 49 – Ensaio com a fonte de bancada ajustada em 10 Vcc.....	85
Figura 50 – Ensaio com a fonte de bancada ajustada em 15 Vcc.....	86
Figura 51 – Ensaio com a fonte de bancada ajustada em 20 Vcc.....	86
Figura 52 – Ensaio com a fonte de bancada ajustada em 25 Vcc.....	87
Figura 53 – Ensaio com a fonte de bancada ajustada em 30 Vcc.....	87
Figura 54 – Ensaio com módulo FV orientado para o norte..	89
Figura 55 – Resultado experimental com módulo direcionado para o norte e ângulo de 0° realizado às 13h09mi do dia 12/04/2019.....	89
Figura 56 – Resultado experimental com módulo direcionado para o norte e ângulo de 5° realizado às 13h03min do dia 12/04/2019.....	90
Figura 57 – Resultado experimental com módulo direcionado para o norte e ângulo de 10° realizado às 13h14min do dia 12/04/2019.....	90
Figura 58 – Resultado experimental com módulo direcionado para o norte e ângulo de 0° realizado às 14h00min do dia 17/04/2019.....	91

Figura 59 – Resultado experimental com módulo direcionado para o norte e ângulo de 5° realizado às 14h13min do dia 17/04/2019.....	91
Figura 60 – Resultado experimental com módulo direcionado para o norte e ângulo de 18° realizado as 14h08min do dia 17/04/2019.....	92
Figura 61 – Resultado experimental com módulo direcionado para o norte e ângulo de 25° realizado às 14h20min do dia 17/04/2019.....	92
Figura 62 – Gráfico incluindo a irradiação estimada (em vermelho) e os dados da estação meteorológica no dia 12/04/2019 entre os horários de 11h00min e 15h00min.....	94
Figura 63 – Gráfico incluindo a irradiação estimada (em vermelho) e os dados da estação meteorológica no dia 17/04/2019 entre os horários de 11h00min e 15h00min.....	94
Figura 64 – Temperatura medida pela câmera termográfica durante o ensaio do dia 12/04/2019.....	95
Figura 65 – Temperatura medida pela câmera termográfica durante o ensaio do dia 17/04/2019.....	95
Figura 66 – Comparação curva obtida na prática (em vermelho) com a curva obtida na simulação (em azul), painel com orientação para o norte a 0° em 12/04/2019 às 13h09min, temperatura de 67,8° C e irradiação estimada de 917 W/m².....	96
Figura 67 – Comparação curva obtida na prática (em vermelho) com a curva obtida na simulação (em azul), painel com orientação para o norte a 5° em 12/04/2019 às 13h03min, temperatura de 67,8° C e irradiação estimada de 926 W/m²..	96
Figura 68 – Comparação curva obtida na prática (em vermelho) com a curva obtida na simulação (em azul), painel com orientação para o norte a 10° no dia 12/04/2019 às 13h14min, temperatura de 67,8 °C e irradiação estimada de 953 W/m²..	97
Figura 69 – Comparação curva obtida na prática (em vermelho) com a curva obtida na simulação (em azul), painel com orientação para o norte a 0°, em 17/04/2019 às 14h01min, temperatura de 54,5° C e irradiação estimada de 817 W/m².....	97
Figura 70 – Comparação curva obtida na prática (em vermelho) com a curva obtida na simulação (em azul), painel com orientação para o norte a 5°, em 17/04/2019 14h13min, temperatura de 54,5° C e irradiação estimada de 830 W/m².....	98
Figura 71 – Comparação curva obtida na prática (em vermelho) com a curva obtida na simulação (em azul), painel com orientação para o norte a 18°, em 17/04/2019 às 14h08min e temperatura de 54,5° C e irradiação estimada de 994 W/m².....	98

Figura 72 – Comparação curva obtida na prática (em vermelho) com a curva obtida na simulação (em azul), painel com orientação para o norte a 25°, em 17/04/2019 às 14h21min, temperatura de 54,5° C e irradiação estimada de 890 W/m ²	99
Figura 73 – Interpretação geométrica do Método de Newton.	110
Figura 74 – Janela que é aberta ao clicar no botão “Caracterizações Salvas”	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do módulo FV utilizado para simulação.	54
Tabela 2 – Valores medidos de tensão na placa e seus respectivos valores reais medidos com o multímetro..	70
Tabela 3 – Valores medidos de “corrente na placa” e seus respectivos valores de corrente real medidos com multímetro True Rms..	75
Tabela 4 – Ensaio realizado com a fonte de bancada.....	88
Tabela 5 – Resultados dos ensaios com o módulo FV em diferentes inclinações.....	99
Tabela 6 – Resultados da simulação computacional com os mesmos parâmetros encontrados na prática.....	100
Tabela 7 – Resultado das comparações realizadas entre a simulação computacional e os ensaios práticos.....	101
Tabela 8 – Estimativa de preço do sistema proposto.....	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
CC	Corrente contínua.
CDT	Controlador Diferencial de Temperatura.
CI	Circuito Integrado.
Cnumad	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, Rio 92.
CO ₂	Dióxido de carbono.
COP6	6ª Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas.
DDP	Diferença de potencial.
Eg	Energia de <i>Gap</i>
FV	Fotovoltaico (a)
GD	Geração Distribuída
GEE	Gases causadores de efeito estufa.
GND	Ground (referência, terra).
Grid Tie	Tipo de inversor utilizado nos sistemas fotovoltaicos <i>on grid</i> .
GUID	Graphical User Interface Development Environment.
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> .
I _{DS}	Corrente de drain-source
Impp	Corrente de máxima potência.
Isc	Corrente de Curto Circuito.
I-V	Curva de Corrente x Tensão.
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> .
MPP	Ponto de máxima potência.
NUPEP	Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência.
PIB	Produto Interno Bruto.
P _{máx}	Máxima Potência (MPP).
ppm	Partes por milhão.
PRODEM	Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios.
PROINFA	Programa de Incentivo a Fontes Alternativas.
P-V	Curva de Potência x Tensão.

SAS	Sistema de Aquecimento Solar.
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, conhecido como <i>on grid</i> .
SFI	Sistemas Fotovoltaicos Isolado, conhecido como <i>off grid</i> .
SFV	Sistemas Fotovoltaicos.
STC	<i>Standart Test Conditions</i> .
TBJ	Transistor Bipolar de Junção.
USB	<i>Universal Serial Bus</i> .
V _{cc}	Tensão em corrente contínua.
V _{DS}	Tensão de <i>drain-source</i>
V _{GS}	Tensão de <i>gate-source</i>
V _{mpp}	Tensão de máxima potência.
V _{oc}	Tensão de circuito aberto.
V _t	<i>Threshold Voltage</i> (Tensão de Limiar do MOSFET).

SÚMARIO

Capítulo 1	19
Introdução	19
1.1 Considerações Iniciais	19
1.2 Estrutura do Trabalho	22
Capítulo 2	23
Energia Solar	23
2.1 Aspectos Gerais	23
2.1.1 Energia Térmica	24
2.1.2 Energia Fotovoltaica	26
2.2 Células Fotovoltaicas	32
Capítulo 3	42
Modelo Matemático da Célula Fotovoltaica	42
3.1 Circuito Equivalente	42
Capítulo 4	55
Construção do Caracterizador Fotovoltaico	55
4.1 Método Utilizado e Princípio de Funcionamento	55
4.2 Circuitos e Componentes Utilizados	59
4.2.1 Calibração do Sistema de Aquisição	68
4.3 Algoritmo E Interface Gráfica	77
Capítulo 5	83
Ensaio, Resultados e Discussões	83
5.1 Ensaio Com Fonte De Bancada Simulando Um Pannel	83
5.2 Ensaio Com o Pannel Fv	88
5.3 Comparativo Entre Simulação E Prática	93
Capítulo 6	104
Considerações Finais e Sugestões Para Trabalhos Futuros	104
Referências	106

Apêndice A – Método de Newton, utilizado para obtenção da curva característica dos módulos fotovoltaicos.	110
Apêndice B – Algoritmos utilizados na IDE do Arduino e GUIDE do MATLAB	119

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Durante o século XX, os combustíveis fósseis como o petróleo e o carvão mineral, foram explorados como as principais fontes de energia para a geração de eletricidade. Esses combustíveis deram suporte, em nível mundial, para o crescimento econômico e para o desenvolvimento social. Tamanha expansão econômica ocorrida nesse período demandava aumento proporcional na geração de energia elétrica, porém os recursos naturais utilizados até o momento não poderiam ser vistos como a única solução, pois além de poluentes ao meio ambiente, não são renováveis e se tornam cada vez mais escassos.

Desse modo a utilização e a dependência dos combustíveis fósseis tornou-se uma preocupação mundial. No início dos anos 90 a comunidade científica fez um alerta sobre os efeitos da deterioração ambiental provocada pela ação humana [1]. Um deles é o aquecimento global, potencializado pela queima de combustíveis fósseis em larga escala, os quais são responsáveis pela emissão de gases causadores de efeito estufa (GEE), em especial o dióxido de carbono (CO_2). Outro desdobramento é a degradação do meio ambiente para a extração de tais recursos naturais.

A segunda metade do século XX foi marcada pela realização de eventos científicos voltados a discutir e aprovar medidas para mitigar os impactos da crescente utilização dos combustíveis fósseis, com destaque para a II Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), também conhecida como Rio-92 e para a 6ª Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP6) realizada no Japão [2], responsável pela assinatura do protocolo de Kyoto em 1997. A Rio-92 ficou conhecida como o mais importante e promissor encontro planetário do século XX devido a assinatura de vários documentos relevantes ao tema ambiental, destacando-se a “Agenda 21”, termo utilizado para ressaltar o desejo de mudança para um novo modelo de desenvolvimento no século XXI [2].

A produção de energia elétrica inicia o século XXI com o desafio de mitigar os impactos ambientais devido à crescente da economia. As discussões sobre este assunto levaram ao termo de “desenvolvimento sustentável”, que é entendido como aquele que atende as necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades [1,2, 3].

A política de desenvolvimento sustentável se tornou imprescindível para o crescimento econômico em harmonia com o uso consciente dos recursos naturais. Esse cenário favoreceu o estudo para a inclusão de fontes alternativas na matriz energética brasileira, como a eólica e solar, que têm recebido incentivos e se popularizado nos últimos anos. No entanto a energia solar fotovoltaica (FV), que é o foco deste projeto, ainda é pouco expressiva quando se trata da matriz energética mundial, o que é notório no Brasil.

O desenvolvimento socioeconômico no Brasil, assim como no restante do mundo, impõe uma demanda crescente de energia. A melhoria na qualidade de vida da população possibilita o acesso a infraestruturas básicas como moradia, saneamento e transporte, bem como a outros recursos vistos anteriormente como supérfluos ou de luxo, tal como eletroeletrônicos em geral (televisão, celular, forno micro-ondas dentre outros) [3].

A comunidade rural também colabora com o crescimento da demanda energética. Nos últimos 10 anos houve um acréscimo de cerca de 3,2 milhões de domicílios rurais com eletricidade. Em consequência o consumo de energia per capita, vem crescendo proporcionalmente ao aumento do PIB, elevando a intensidade energética da economia brasileira cerca de 2% ao ano [3].

O Brasil, apesar de possuir um parque gerador formado por tecnologias consolidadas como a hidrelétrica, termelétrica e eólica vive um momento de efervescência acerca da energia solar fotovoltaica. Este otimismo alcançou não somente empreendedores e consumidores, como também fornecedores, governo nas esferas federal e estadual, além de órgãos reguladores. Todos esses se empenhando para eliminar obstáculos e fomentar o desenvolvimento da fonte fotovoltaica, que nos próximos anos deve ampliar exponencialmente a sua participação na matriz energética nacional [4].

A esperada ascensão da energia fotovoltaica no país se mostra um contexto ideal para estudos sobre essa forma de geração, principalmente em baixa potência que é o caso da geração distribuída (GD) a qual engloba principalmente consumidores residenciais e comerciais, que apesar de possuir um consumo médio de energia elétrica individualmente, são significativamente numerosos em grupo.

No contexto apresentado da diversificação da matriz energética brasileira, este trabalho se coloca com o objetivo de simular, via computador, o comportamento dos módulos solares e de construir um protótipo de um caracterizador de curvas para painéis fotovoltaicos, de baixo custo. Esse caracterizador obterá dados reais dos módulos solares e irá gerar curvas características de I-V (Corrente-Tensão) e P-V(Potência-Tensão), enviando estes dados para um supervisor, onde poderão ser avaliados, auxiliando na determinação do ponto de máxima potência e eficiência destes painéis, também permitirá avaliar a influência de variáveis externas, como sujeira e sombreamento.

As curvas características para painéis fotovoltaicos também podem ser encontradas através de simulações computacionais, com o auxílio de métodos numéricos, reproduzindo assim o comportamento de um painel fotovoltaico sob as variações de temperatura e irradiação. Os módulos fotovoltaicos possuem características não lineares em seu modelo matemático devido a utilização de materiais semicondutores na sua construção. Um método iterativo bastante utilizado para resolver equações não lineares é o método de Newton Raphson, o qual será aplicado no presente trabalho.

O caracterizador de painéis fotovoltaicos é um instrumento, tecnologia ou algoritmo com a função de obter as curvas características de um sistema fotovoltaico [5]. O princípio de funcionamento do caracterizador se baseia na aquisição de dados, especificamente corrente e tensão do painel ou arranjo fotovoltaico. Entretanto para a obtenção da curva característica é necessário o controle da corrente fornecida, variando do ponto de curto-circuito até o ponto de circuito aberto [5]. Existem na literatura vários métodos para realizar essa variação da carga vista pelos terminais do painel, como o do resistor variável, da carga capacitiva, da carga eletrônica e do conversor estático CC-CC [5, 6]. Neste projeto será utilizado o método da carga eletrônica, que será detalhado no capítulo 4.

A utilização de uma simulação computacional e de um método prático possibilitará comparar os resultados simulados com os obtidos pelo protótipo, a fim de avaliar a eficácia destes dois métodos.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado conforme descrito abaixo:

- Capítulo 1 – Introdução.
- Capítulo 2 – Energia Solar.
- Capítulo 3 – Modelo Matemático da célula fotovoltaica.
- Capítulo 4 – Construção do caracterizador fotovoltaico.
- Capítulo 5 – Ensaios, resultados e discussões.
- Capítulo 6 – Considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.
- Referências.
- Apêndice A – Método de Newton, utilizado para a obtenção da curva característica dos módulos fotovoltaicos.
- Apêndice B – Algoritmos utilizados na IDE do Arduino e na interface gráfica do MATLAB.

O **capítulo 2** apresenta os conceitos de energia solar, seus aspectos gerais, assim como as suas formas de utilização como energia térmica e energia fotovoltaica, explicando de maneira sucinta o processo de dopagem em semicondutores e sua utilização na fabricação de células fotovoltaicas. Esse capítulo abrange também o crescimento da energia fotovoltaica no Brasil e no mundo.

O **capítulo 3** descreve o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica e a sua utilização para a determinação das curvas características por simulação computacional utilizando o Método de Newton.

O **capítulo 4** mostra a construção do protótipo de um caracterizador fotovoltaico explicando os seus circuitos de maneira individual. Esse capítulo apresenta o funcionamento dos circuitos utilizados para que o MOSFET funcione como uma carga eletrônica controlada.

O **capítulo 5** apresenta os ensaios realizados com o intuito de comparar os dados obtidos na prática com os dados de simulação computacional, comparando-os graficamente e analiticamente.

O **capítulo 6** apresenta as considerações finais sobre o trabalho, juntamente com as sugestões para trabalhos futuros, com base nos resultados obtidos.

CAPÍTULO 2

ENERGIA SOLAR

2.1 ASPECTOS GERAIS

O Sol é uma estrela de tamanho médio e a energia irradiada por ele é consequência das reações de fusão nuclear, onde a sua temperatura pode chegar a 5.778 K (5.505° C). A taxa de energia emitida pelo Sol permanece praticamente constante há bilhões de anos com uma potência em torno de $3,86 \cdot 10^{26}$ W [3]. Esta energia chega à superfície da Terra na forma térmica e luminosa, e é considerada inesgotável quando comparada com a escala de tempo terrestre, essa característica torna a energia solar uma das fontes alternativas mais promissoras do milênio [7].

Segundo [3], a energia solar ao passar pela atmosfera terrestre, se manifesta na forma de luz visível, raios ultravioleta e infravermelhos. É possível captar essa luz e transformá-la em alguma forma de energia utilizada pelo homem: térmica ou elétrica. São os equipamentos utilizados nessa captação que determinam qual será o tipo de energia obtida [1]. Basicamente a forma de energia térmica como o próprio nome diz aproveita o calor irradiado pelo Sol, enquanto que a energia fotovoltaica converte diretamente luz em eletricidade.

De acordo com [8] todas as fontes de energia são, mesmo que em última instância, derivadas em sua maioria da energia do Sol. A partir dela, ocorre o fenômeno da evaporação/precipitação, responsável pelo ciclo hidrológico e consequentemente na continuidade da reserva de água podendo assim ser represada para produção de energia hidroelétrica [3, 7, 8]. Petróleo, Carvão e gás natural foram gerados a partir de resíduos de plantas e animais, que receberam energia do Sol para o seu desenvolvimento [7]. A energia do Sol também é a fonte de energia para a realização da fotossíntese de matéria orgânica, como a cana-de-açúcar, que posteriormente, pode ser transformada em combustíveis nas usinas [8].

Uma vez que a energia oriunda do Sol está indiretamente associada às demais fontes geradoras utilizadas pelo homem, utilizar o seu potencial de forma direta é uma opção viável, que se apresenta como uma oportunidade de aproveitamento deste vasto recurso energético.

2.1.1 ENERGIA TÉRMICA

O aproveitamento da energia térmica consiste na quantidade de energia em forma de calor que um corpo é capaz de absorver, a partir da radiação incidente sobre o mesmo. Segundo [8] a utilização desta forma de energia consiste não somente em saber captá-la, mas também armazená-la, sendo os equipamentos mais conhecidos para esta finalidade, os coletores solares.

Os coletores podem ser classificados em concentradores ou planos, em função da existência ou não de um dispositivo de concentração da radiação solar, sendo este utilizado exclusivamente nos coletores concentradores. O fluido aquecido pode ser mantido em reservatórios termicamente isolados até o seu uso final [8].

Devido à popularidade dos coletores planos, principalmente em residências, esse modelo será abordado com maior detalhe, no entanto o tema não será aprofundado, pois o objeto de estudo deste projeto não é a energia solar térmica, e sim, a energia solar fotovoltaica.

O coletor solar plano fechado possui uma simples fabricação, sendo basicamente constituído por uma caixa externa, isolamento térmico, flauta/serpentina (tubos de cobre), placa absorvedora (aletas pintadas em negro), cobertura transparente e vedação, assim como na Figura 1 [9, 10].

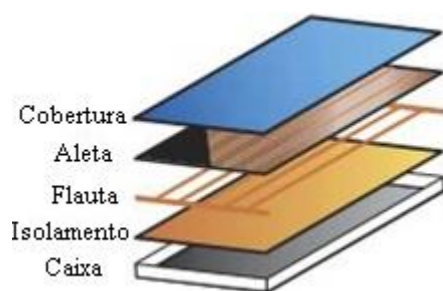


Figura 1 – Coletor Solar Plano
Fonte: [9].

Dentro desse contexto vale ressaltar que os coletores solares são amplamente utilizados para aquecimento de água em residências, hospitais, hotéis e são conhecidos como Sistemas de Aquecimento Solar (SAS).

Segundo [9], o fator que determina uma melhor seleção do coletor é a temperatura e a aplicação do fluido aquecido, sendo os coletores fechados planos os mais comercializados

para o aquecimento de água com fins sanitários, atingindo temperaturas superiores a 80° C. Esses coletores possuem aplicações diversas, como por exemplo, produzindo ar quente para secagem de grãos, água aquecida para banho, aquecimento de piscina e higienização de ambientes visando à redução no consumo de energia elétrica ou de gás [8, 11].

Os SAS de forma geral, quanto à circulação de água, podem ser divididos em duas formas:

- **Termossifão ou Circulação Natural:** Este tipo de processo acontece de forma natural devido ao fenômeno que ocorre quando a água se aquece, o que deixa sua densidade menor do que a da água em temperatura ambiente (fria), assim a água fria (mais pesada) empurra a água quente (mais leve), dessa forma há circulação natural entre o coletor e o reservatório, este processo é conhecido como convecção. Segundo [9] este sistema, que é autorregulado de acordo com o nível de radiação solar, sendo recomendado para instalações de pequeno porte com volumes de armazenamento de até 1000 litros de água.
- **Bombeamento ou Circulação Forçada:** Neste tipo de SAS a água circula entre os coletores e o reservatório térmico através da força exercida por uma bomba hidráulica que é acionada por um controlador diferencial de temperatura (CDT) [9]. Este controlador diferencial compara a temperatura de dois sensores, um ligado ao reservatório térmico e outro ligado nos coletores, fazendo com que a bomba ligue ou desligue a partir de uma determinada diferença de temperatura. Este tipo de instalação é recomendado para reservatórios com volumes superiores a 1000 litros [9, 10].

A Figura 2 mostra a diferença entre os dois sistemas.

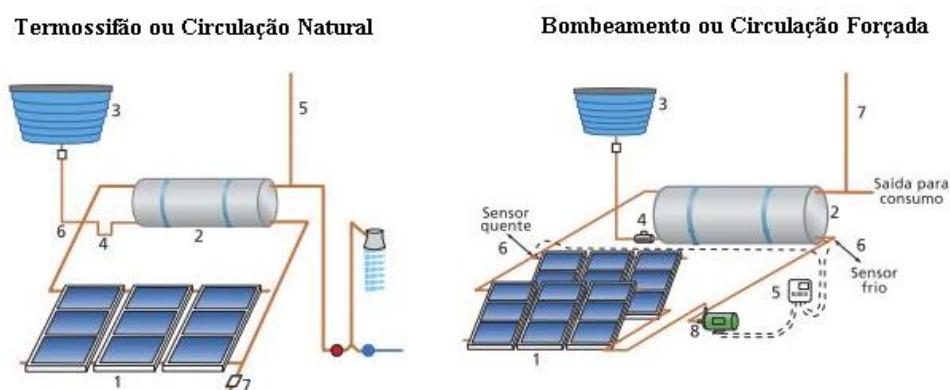


Figura 2 - Diferença física entre SAS de circulação Natural e Forçada.
Fonte adaptada: [9].

Termossifão ou Circulação Natural:

- 1- Coletores Solares;
- 2- Reservatório Térmico;
- 3- Caixa de água fria;
- 4- Sifão;
- 5- Respiro;
- 6- Alimentação de água fria;
- 7- Dreno.

Bombeamento ou Circulação Forçada:

- 1- Coletores Solares;
- 2- Reservatório Térmico;
- 3- Caixa de água fria;
- 4- Válvula de retenção;
- 5- Controlador diferencial de temperatura;
- 6- Sensores de temperatura;
- 7- Respiro (ou válvulas de alívio de pressão);
- 8- Bomba hidráulica;

2.1.2 ENERGIA FOTOVOLTAICA

O Efeito Fotovoltaico é o fenômeno responsável pela conversão da luz solar em energia elétrica, descoberto por Edmond Becquerel em 1839, que pela primeira vez observou o aparecimento de diferença de potencial (DDP) nos extremos de um material semicondutor quando exposto a luz visível, daí o termo Energia Fotovoltaica (FV) [7]. O primeiro aparato fotovoltaico foi concebido em 1876, porém apenas em 1956 iniciou-se a produção industrial impulsionada pelo avanço da microeletrônica [8].

A utilização em sistemas de telecomunicações como fonte de energia em localidades remotas foi uma das primeiras aplicações para essa tecnologia, que buscava incentivos ao seu crescimento [8]. O uso de fotocélulas teve também um papel importante em programas espaciais, com a chamada “corrida espacial”, houve um significativo avanço na tecnologia fotovoltaica, que possibilitou o aprimoramento no processo de fabricação, melhorando principalmente a eficiência e peso das células [7, 8]. A energia fornecida pelas células fotovoltaicas era e continua sendo o meio mais adequado (menor custo, peso e segurança) para fornecer a energia necessária por longos períodos de tempo a equipamentos eletroeletrônicos no espaço [8].

Nesta perspectiva, os interesses em energia solar fotovoltaica (FV) estavam voltados a aplicações específicas, visto que, o alto custo na produção de células fotovoltaicas impossibilitava a sua fabricação em larga escala para aplicações comuns. A crise do petróleo de 1973 fez com que o mundo se preocupasse com a questão de se obter fontes alternativas de energia, estando a tecnologia de fotocélulas dentre as mais cotadas, entretanto seria necessária

uma redução no custo de produção de células fotovoltaicas em até 100 vezes em relação às células usadas em aplicações espaciais, para tornar essa alternativa economicamente viável [7, 8].

A crescente preocupação mundial com os impactos ambientais causados pelo uso indiscriminado dos recursos naturais repercutiu positivamente no incentivo a tecnologias para ampliação da participação das fontes de energia alternativas na matriz energética mundial, onde se insere a energia fotovoltaica. Incentivos percebidos por meio de políticas públicas, redução tributária na produção de fotocélulas e programas sociais, que juntos colaboram para o aumento da produção de energia fotovoltaica.

No decorrer dos anos a hegemonia em relação a potência instalada de energia fotovoltaica foi dos países da Europa. Entretanto o aumento exponencial de sistemas FV instalados em países asiáticos como a China, colocou a liderança dos países europeus em cheque [5].

Conforme dados expostos nos gráficos das Figuras 3 e 4, apresentados abaixo, a China atualmente superou os países europeus em geração fotovoltaica, se consolidando como o detentor da maior potência instalada no mundo [12].

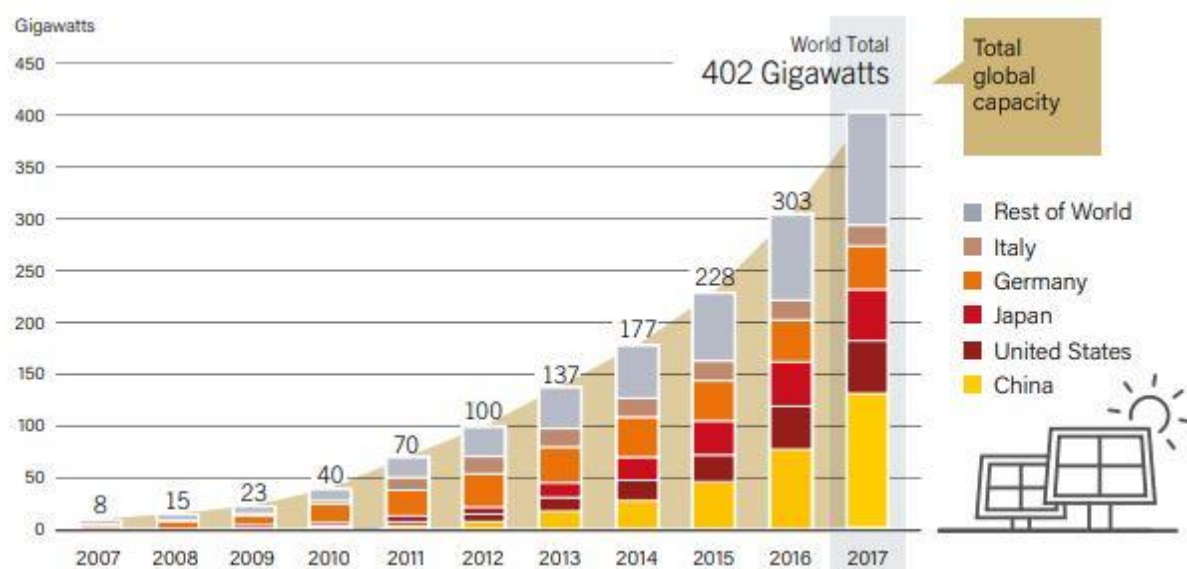


Figura 3 – Crescimento anual de geração fotovoltaica no mundo.
Fonte: [12].

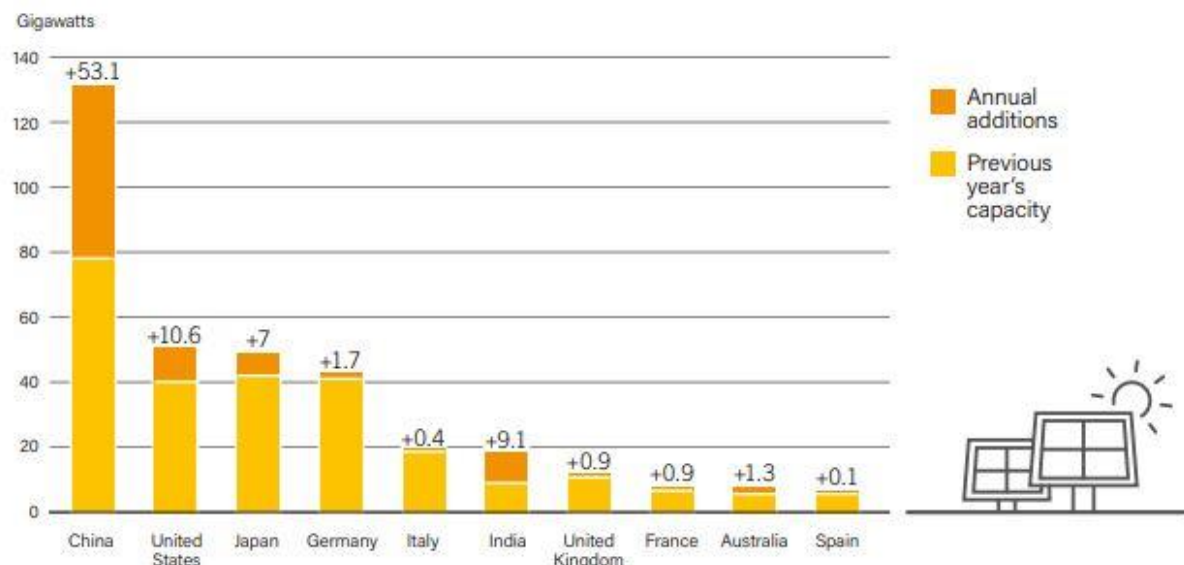


Figura 4 – Capacidade Solar Fotovoltaica dos principais Países.

Fonte: [12].

Conforme análise do gráfico da Figura 3, a produção mundial de energia solar teve um aumento exponencial nos últimos 10 anos, com destaque para a China, que no ano de 2017 ultrapassou a geração dos países europeus, como pode ser visto na Figura 4, aumentando em 53 GW a potência instalada de energia fotovoltaica no país. Este aumento colabora para o crescimento da economia do país, visto que a China é o principal produtor de painéis fotovoltaicos do mundo, sendo responsável por mais de 50 % desta produção [13].

Em contraste com o avanço mundial, no Brasil a energia fotovoltaica era utilizada principalmente por instituições de pesquisa em conjunto com concessionárias de energia elétrica, utilizando sistemas isolados ou híbridos em localidades afastadas da rede elétrica, com o intuito de levantar dados e realizar pesquisas [5, 8].

Mesmo que ainda pouco expressiva na matriz energética, a geração de eletricidade por painéis fotovoltaicos tem se popularizado com a criação de políticas públicas para o seu incentivo. Dentre os principais programas criados, destaca-se o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEM) em 1994, com o intuito de promover a eletrificação rural, utilizando sistemas fotovoltaicos como fonte principal [7, 8]. Em 2002 o Programa de Incentivo a Fontes Alternativas (PROINFA), foi criado com o intuito de aumentar a participação das fontes alternativas na matriz energética do país [5, 8].

Um marco para a popularização da geração fotovoltaica conectada a rede, foi a Resolução Normativa nº 482/2012, que trata da micro e minigeração distribuída, atividade

que não era regulamentada no país [5, 8]. Recentemente a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), fez uma revisão na resolução 482 /2012, através da REN nº 687/2015 entre as mudanças estão a redefinição dos limites de potência para microgeração que mudou de 100 kW para 75 kW e minigeração de 1 MW para 3 MW em fontes hidráulicas e 5 MW para outras fontes. Também foi revisado o sistema de geração de créditos, cuja validade dos créditos passou de 36 meses para 60 meses [14, 15]. Esta atualização da norma passou a ser válida a partir de 01 de março de 2016 [15].

Os sistemas de geração solar podem ser classificados em duas categorias principais: autônomo ou isolado (SFI) e conectados à rede (SFCR). Esses sistemas podem operar exclusivamente com a fonte fotovoltaica (SFV) ou combinados com uma ou mais fontes de energia, nesse caso denominados sistemas híbridos [8].

Sistemas isolados são aqueles que não dependem da rede elétrica convencional para funcionar, por isso são conhecidos como Sistemas *Off Grid* (“desconectados da rede”, em uma tradução literal), são utilizados especialmente em locais isolados onde a rede de distribuição não tem alcance e a sua expansão se torna inviável tecnicamente e economicamente, para atender um grupo pequeno de consumidores [8, 16].

Na prática, a maior parte dos SFI utilizam um armazenamento de energia elétrica por meio de baterias recarregáveis chamados também de acumuladores de carga, com o intuito de suprir a demanda nos momentos de ausência da radiação solar. No entanto esta não é a única forma de armazenagem de energia, podendo ser utilizada a armazenagem de energia gravitacional por meio do bombeamento de água para tanques elevados, armazenamento de ar comprimido e produção de hidrogênio [8].

Conforme apresentado na Figura 5 os SFI contam com uma unidade responsável pelo controle e o condicionamento da potência composta por um inversor e um controlador de carga.

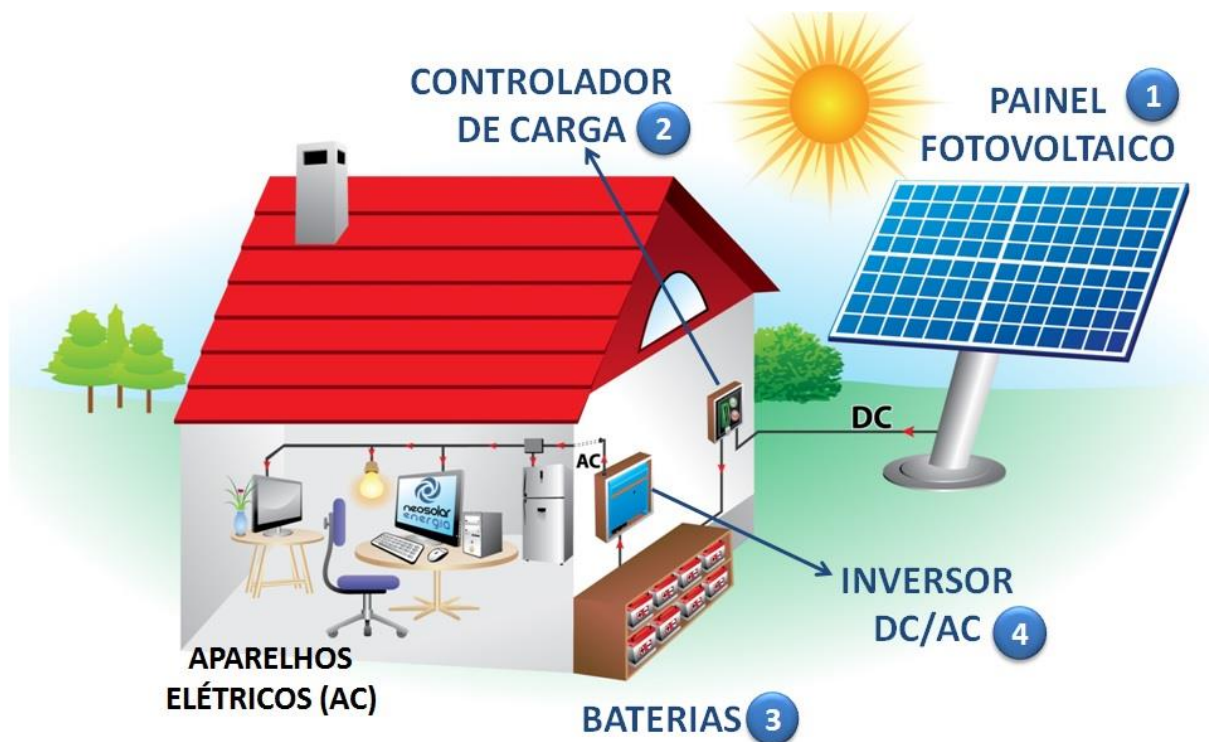


Figura 5 – Exemplo de SFI suprindo a demanda energética de uma residência.
Fonte [17].

Sistemas conectados à rede elétrica, como o próprio nome diz, funcionam interligados a rede de distribuição, por isso são chamados de *On Grid* (“conectado a rede”, em tradução literal). Esse tipo de conexão foi regulamentado através da Resolução Normativa 482/2012 e ficou conhecida como Geração Distribuída (GD), porém não se limita apenas a Sistemas Fotovoltaicos (SFV) [8]. Os SFCR trabalham em conjunto com a rede elétrica cedendo potência nos momentos em que a sua geração excede o consumo, e recebendo potência da rede quando a sua geração é menor do que o consumo da unidade consumidora [14].

A medição da potência gerada e consumida é feita por um medidor bidirecional, caso o saldo mensal seja positivo, este poderá ser acumulado e abatido no consumo de outro mês ou até mesmo de outra unidade consumidora previamente cadastrada desde que esteja na mesma área de concessão e seja do mesmo titular, essa modalidade é denominada autoconsumo remoto [14, 18].

Atualmente os SFCR não podem operar ilhados, ou seja, caso falte energia da rede de distribuição o sistema deverá desacoplar-se da rede, atendendo aos critérios de segurança estabelecidos no PRODIST Módulo 3 Seção 3.7 item 4.3 Rev. 724/2016 [18], especificados em suas notas (5) e (6):

(5) Não é necessário relé de sincronismo específico, mas um sistema eletroeletrônico que realize o sincronismo com a frequência da rede e que produza uma saída capaz de operar na lógica de atuação do elemento de interrupção, de maneira que somente ocorra a conexão com a rede após o sincronismo ter sido atingido.

(6) No caso de operação em ilha do acessante, a proteção de anti-ilhamento deve garantir a desconexão física entre a rede de distribuição e as instalações elétricas internas à unidade consumidora, incluindo a parcela de carga e de geração, sendo vedada a conexão ao sistema da distribuidora durante a interrupção do fornecimento.

Essa norma torna necessária a utilização de um inversor específico para esse tipo de sistema conhecidos como inversores *Grid Tie*, que são responsáveis por fazer a sincronização entre a rede de distribuição e o sistema fotovoltaico para que não haja conflito entre as duas fontes. Esse também é responsável por desconectar o sistema no momento em que a rede da distribuidora não possui eletricidade. Como podemos observar na Figura 6, os SFCR, possuem como principal diferença em relação aos SFI a não utilização de baterias e reguladores de carga, além disso, são utilizados modelos diferentes de inversores.

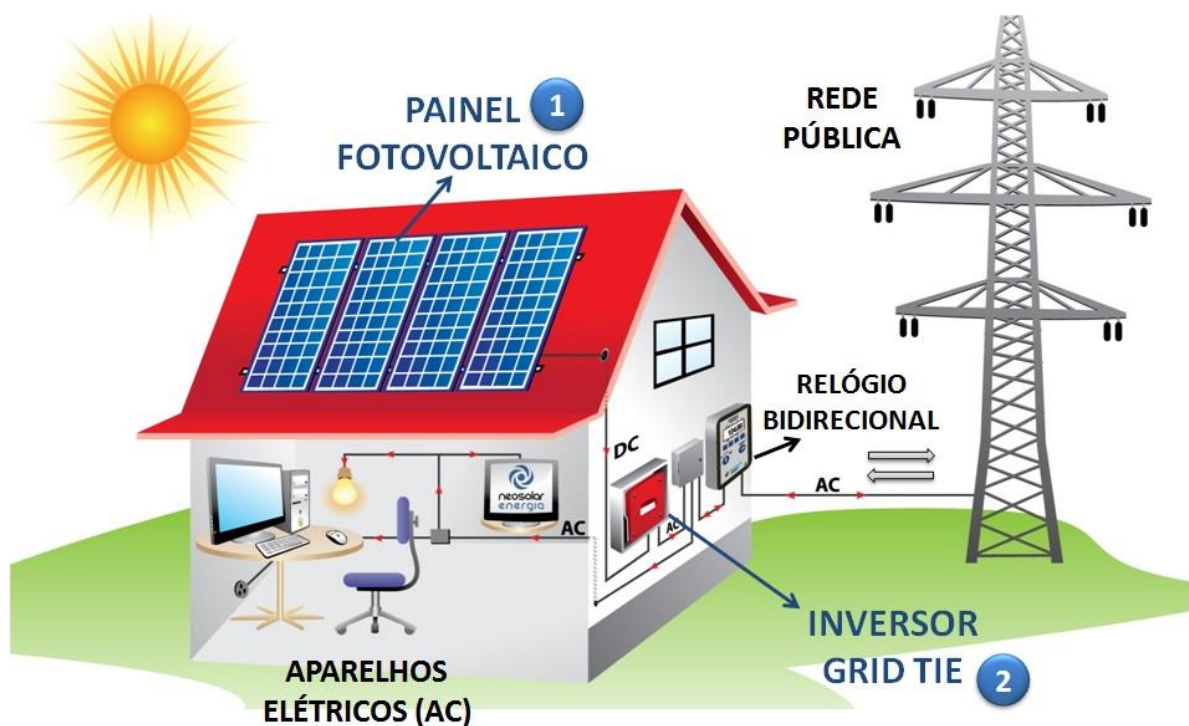


Figura 6 – Exemplo de um SFCR, suprimindo a demanda energética de uma residência.
Fonte: [17].

As políticas públicas para implantação de GD no país têm como objetivo incentivar o crescimento deste tipo de geração, em especial a geração de energia fotovoltaica, que é a principal fonte utilizada nesta modalidade, a qual é responsável por 99,3 % dos empreendimentos registrados de unidades consumidoras totalizando em 76,5 % da potência instalada, logo é perceptível que a principal fonte de GD no Brasil é a fotovoltaica [19].

Conforme exposto no gráfico da Figura 7, o crescimento da GD no país é exponencial, o que pode ser visto como um resultado positivo das políticas de incentivo aplicadas pelo governo. Desde a revisão da REN 482/2012, publicada pela REN 687/2015, podemos observar que em março de 2018 a GD teve um crescimento de aproximadamente 10 vezes em relação a março de 2016.

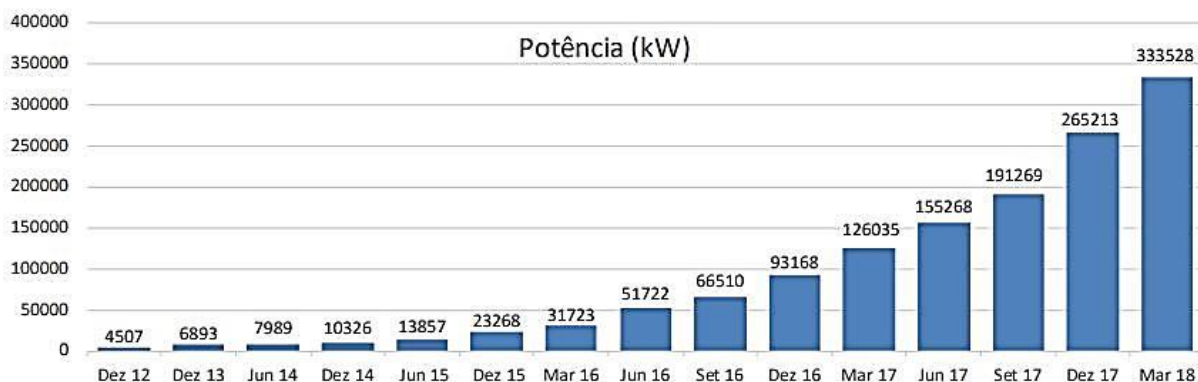


Figura 7 – Evolução da Geração Distribuída no Brasil.
Fonte: [19].

2.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A célula fotovoltaica é considerada a unidade fundamental de um módulo FV, visto que nela ocorre o processo de conversão de energia solar em energia elétrica [5]. A partir da célula fotovoltaica é possível criar módulos e arranjos fotovoltaicos, de modo a aumentar a potência gerada. A principal matéria prima utilizada para a sua fabricação é o silício puro, que tem como característica intrínseca ser um semicondutor, apesar de não ser o único material que possui esta característica, é o mais utilizado devido a sua abundância na crosta terrestre.

Os estudos relacionados à Teoria de Bandas em sólidos, proposta por Alan Harris Wilson em 1931, que tiveram como base teorias propostas pelos físicos Felix Bloch em 1928 e Rudolf Ernest Peierls em 1930 [20], juntamente com a descoberta do efeito fotovoltaico, foram de suma importância para a fabricação de células fotovoltaicas de silício. Como colaboração desta teoria está à divisão dos materiais sólidos em condutores, semicondutores e isolantes.

De acordo com Wilson os sólidos possuem níveis discretos de energia que compõem os átomos, denominados bandas de energia ou nível quântico, existem basicamente três principais bandas de energia sendo elas: condução, proibida (*gap*) e valência.

Entende-se por nível proibido, aquele onde não há possibilidade do elétron existir. De forma análoga, os níveis de energia podem ser associados degraus de uma escada, como pode ser visto na Figura 8. Não é possível apoiar os pés entre um degrau e outro, sendo assim é necessário que o elétron salte diretamente da banda de valência para a banda de condução ou vice-versa ganhando ou perdendo energia respectivamente [21].

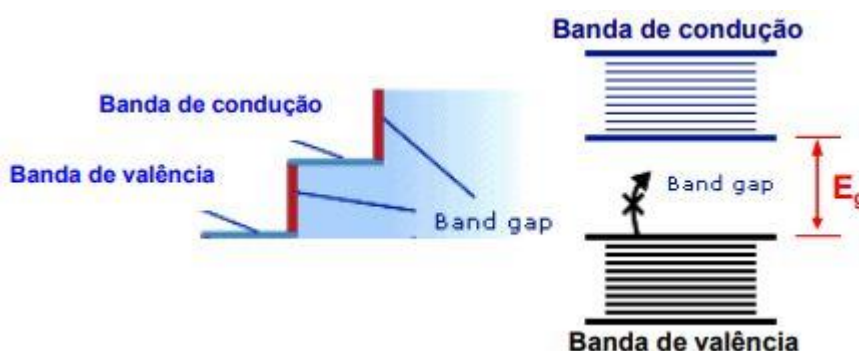


Figura 8 - Analogia entre degraus de uma escada e a banda proibida (GAP).
Fonte: [21].

Nessa perspectiva, o que distingue o material condutor de um isolante é basicamente a quantidade de energia necessária para que o elétron salte da banda valência para a banda de condução. Em um material condutor essa energia é pequena, em contrapartida em um material isolante faz-se necessária mais energia, enquanto que os semicondutores cumprem papel intermediário, não sendo bons condutores tampouco bons isolantes. Essa diferença pode ser observada na Figura 9.

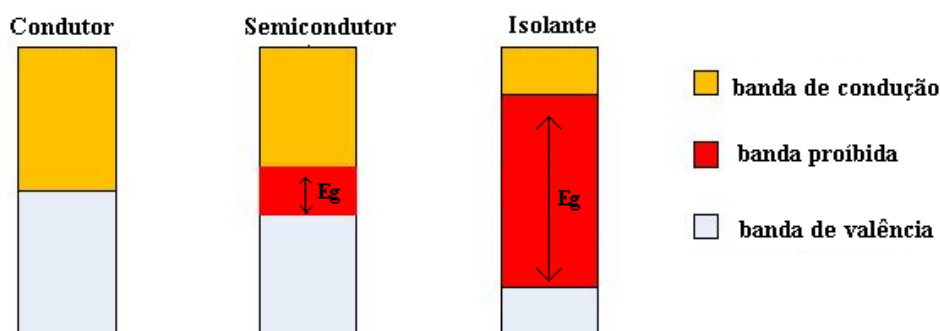


Figura 9 – Bandas de Energia para materiais sólidos.
Fonte: [8].

Conforme esquema proposto na Figura 9, observar-se que os materiais condutores não possuem banda proibida, desta maneira, não necessitam de Energia de *Gap* (E_g) para que os elétrons saiam da banda de valência para a banda de condução. Essa facilidade de deslocamento do elétron entre as bandas de valência e condução determina a boa condução do material, mesmo em baixas temperaturas, enquanto os isolantes se comportam de maneira contrária sendo necessária um E_g muito alto para desprender um elétron da banda de valência.

Os semicondutores, por sua vez podem se comportar como isolantes em temperaturas muito baixas, visto que os elétrons não possuem energia para saltar a banda proibida, mas com o aumento da temperatura os elétrons tendem a saltar a banda proibida se desfazendo das ligações covalentes e deixando lacunas na banda de valência.

Os semicondutores intrínsecos geralmente são tetravalentes, ou seja, possuem 4 elétrons de valência que formam ligações covalentes com os átomos vizinhos, resultando em 8 átomos compartilhados formando uma rede cristalina [8]. Tal estrutura pode ter suas características de condutividade alteradas ao passar por um processo de dopagem, como o que transforma o silício puro em um semicondutor extrínseco. Este processo de dopagem consiste em adicionar impurezas na estrutura cristalina do silício, essas impurezas são átomos trivalentes ou penta-valentes, em geral, a concentração dessas impurezas é muito diluída variando entre 100 e 1000 partes por milhão (ppm) [21].

A adição de átomos com características penta-valentes, como por exemplo, o fósforo (P), resulta em um elétron extra na estrutura cristalina do silício, que não fará parte da ligação covalente, dessa forma o elétron encontra-se fracamente ligado ao núcleo do átomo de fósforo. Este processo permite que através do fornecimento externo de uma pequena quantidade de energia (por exemplo, incidência de luz), o elétron extra se transforme em um elétron livre [8, 21].

Os materiais penta-valentes, pela característica de doar elétrons, são conhecidos como átomos de impurezas doadoras, como se pode observar na Figura 10. Os semicondutores que possuem em sua rede cristalina impurezas do grupo V da tabela periódica, como o antimônio (Sb), arsênio (As) e fósforo (P), são conhecidos como semicondutores extrínsecos tipo N, pois os principais portadores de carga são os elétrons.

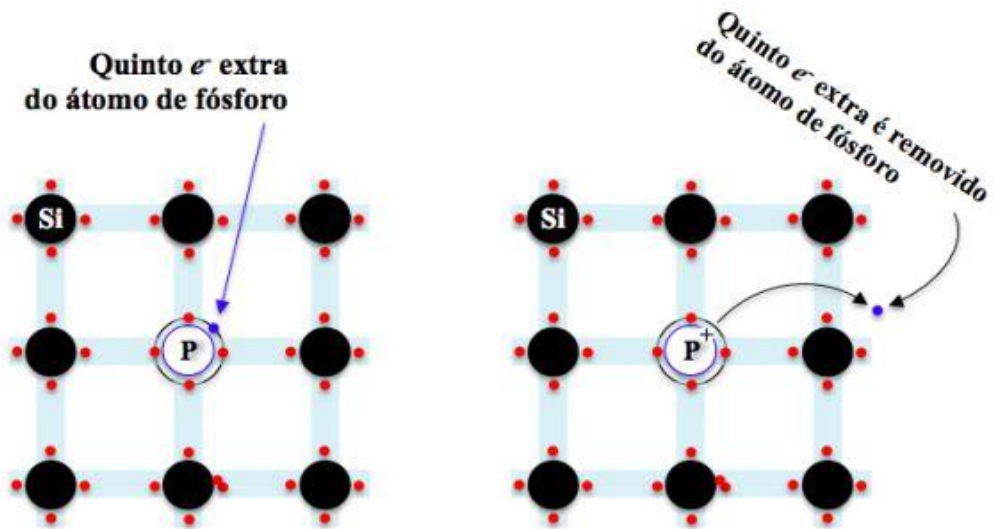


Figura 10 - Representação esquemática dopagem tipo N.
Fonte: [21].

De forma análoga, a adição de uma impureza trivalente, como o boro (B), na estrutura cristalina do silício irá deixar uma lacuna, visto que, haverá a falta de um elétron para as ligações covalentes como é possível verificar na Figura 11. Assim com o fornecimento de uma pequena quantidade de energia, um elétron de um átomo vizinho de silício poderá se deslocar para preencher esta lacuna [8, 21]. Nestas condições o Boro, é um átomo aceitador de elétrons, portanto os semicondutores que possuem em sua rede cristalina impurezas trivalentes, são considerados semicondutores extrínsecos tipo P, pois os principais portadores de carga são as lacunas.

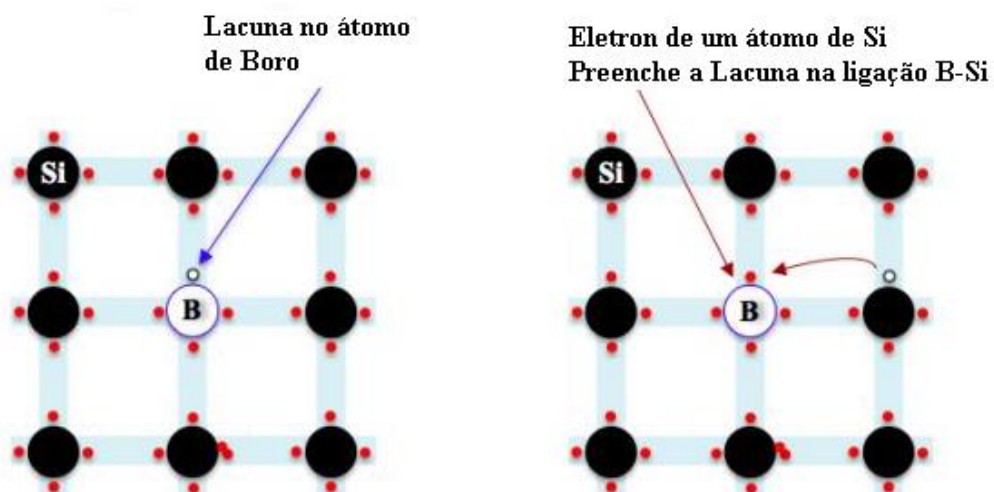


Figura 11- Representação esquemática da dopagem tipo P.
Fonte: [21].

Nesse contexto, em temperatura ambiente os elétrons dos átomos de fósforo e as lacunas dos átomos de boro geram movimento de cargas, devido à incidência de luz (fótons). Porém, para o aproveitamento de tensão e corrente elétrica é necessário aplicar um campo elétrico, que pode ser gerado por junção formada por semicondutores extrínsecos tipo P e tipo N, conhecida por junção P-N [22, 23].

Na interface entre os dois tipos de dopagem, os elétrons da região N se difundem para a região P, dando origem a uma carga positiva na região N, visto que o átomo de fósforo perdeu um elétron P^+ , ao mesmo tempo o átomo de boro na região P recebe um elétron, que por sua vez da origem a uma carga negativa B^- [8]. O campo elétrico criado pelos íons da junção gera uma zona de depleção impedindo a passagem de elétrons do lado N para o lado P e de lacunas do lado P para o lado N. A Figura 12 mostra a junção P-N.

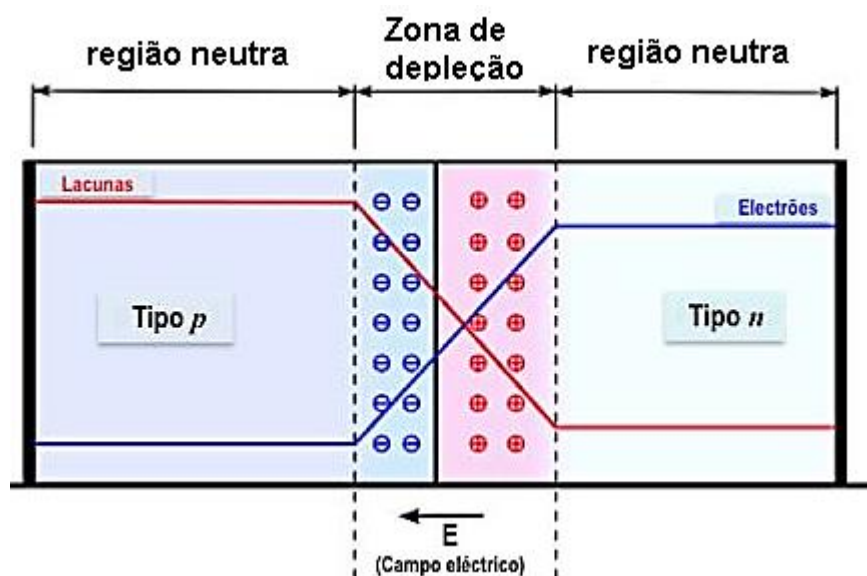


Figura 12 - Zona de depleção junção pn no escuro.
Fonte: [21].

Nessas condições os portadores positivos e negativos estão em equilíbrio, ou seja, não há difusão de elétrons e lacunas devido à zona de depleção também conhecida como barreira de potencial. Entretanto, ao incidir luz sobre a junção P-N, este equilíbrio é desfeito, pois os fótons incidentes podem gerar elétrons-lacuna desde que a sua energia seja maior que E_g . Esses elétrons-lacuna, por sua vez, são acelerados pelo campo elétrico localizado na região da junção, elétrons (foto-gerados na região P) são acelerados para a junção N e as lacunas (foto-geradas na região N), irão se deslocar para a região P [8, 21].

Desta forma ocorre um equilíbrio nas correntes da junção ocasionando uma diferença de potencial elétrico entre os dois lados da junção P-N. Se em cada lado da junção forem conectados terminais de ligação interligados através de um condutor, aparecerá uma corrente denominada fotocorrente, que perdurará na junção P-N enquanto esta estiver iluminada. Na Figura 13 possui um exemplo deste mecanismo [21]. Esse fenômeno descreve o funcionamento de uma célula fotovoltaica, que pode ser vista como um diodo com uma grande área, adaptado para o aproveitamento do efeito fotovoltaico.

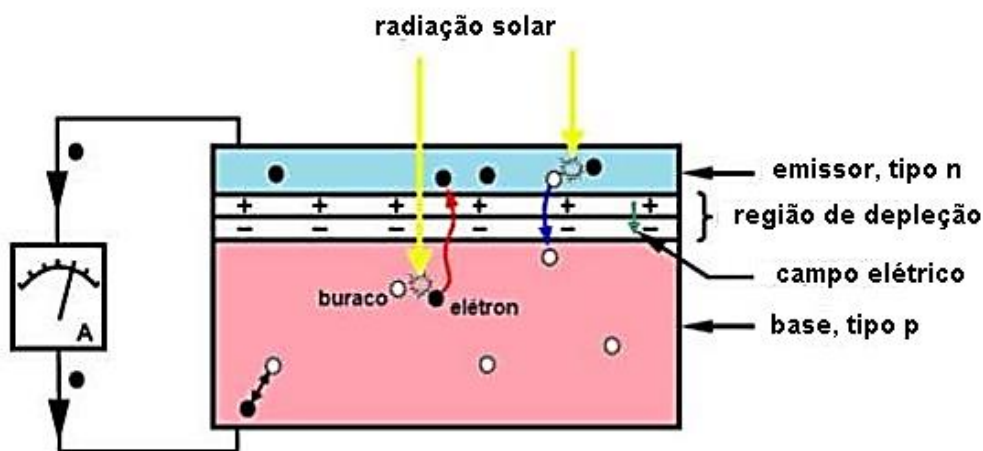


Figura 13 – Princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.
Fonte: [5].

Uma única célula de silício produz uma corrente CC entre 3 A e 5 A e uma tensão da ordem de 0,5 V a 0,7 V . Por este motivo é necessário agrupar várias células em série e/ou paralelo para que os valores de tensão e corrente sejam adequados para aplicações desejadas. A associação de células é chamada de módulo, e a associação de módulos da origem ao arranjo fotovoltaico, também denominado painel fotovoltaico [5]. A Figura 14 esquematiza essa diferença entre célula, módulo e arranjo fotovoltaico e a Figura 15 mostra o símbolo de um módulo fotovoltaico.

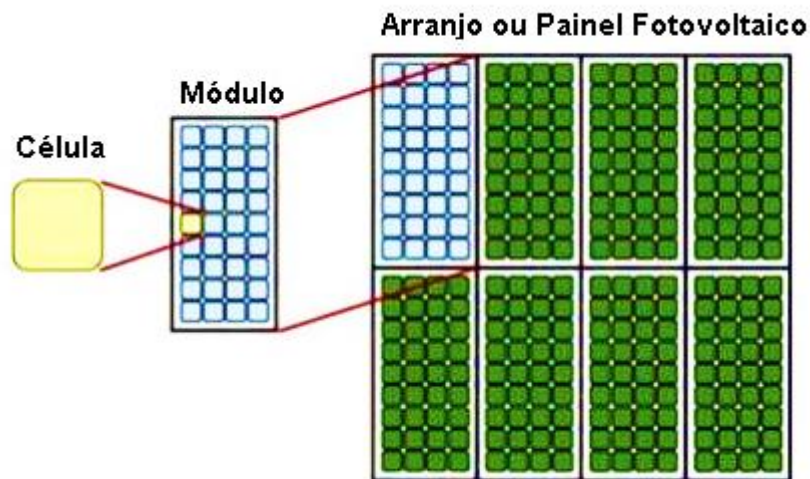


Figura 14 – Diferença entre célula, Módulo, Arranjo ou Painel fotovoltaico.
Fonte: [22].

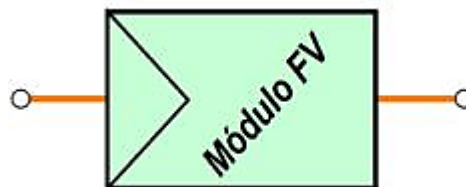


Figura 15 - Símbolo utilizado para um módulo fotovoltaico.
Fonte: [22].

Os módulos fotovoltaicos são conectados em série ou em paralelo de acordo com a aplicação desejada. Na conexão em série, o terminal positivo de um dispositivo fotovoltaico é conectado ao terminal negativo do outro dispositivo, e assim sucessivamente. É importante ressaltar que para esse tipo de associação é ideal utilizar módulos idênticos, pois para dispositivos idênticos expostos a mesma irradiância e temperatura, suas correntes elétricas individuais serão iguais [8, 22]. A Figura 16 apresenta um esquema de associação em série.

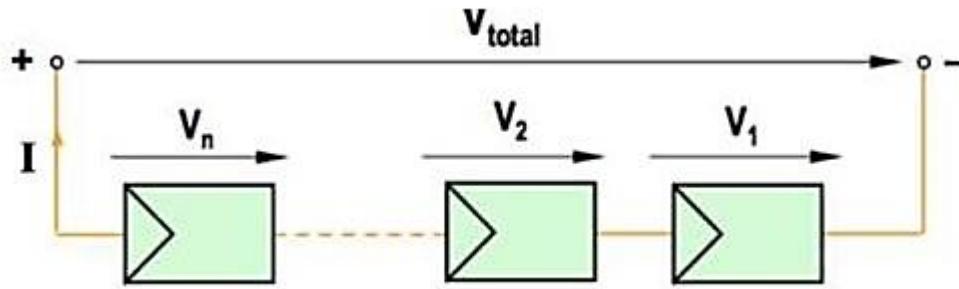


Figura 16 - Associação série de n células fotovoltaicas.
Fonte: [22].

$$V_{Total} = V_1 + V_2 \dots + V_n = n \cdot V \quad (1)$$

$$I_1 = I_2 = \dots = I \quad (2)$$

Desse modo, ocorre uma elevação na tensão proporcional à quantidade de módulos associados em série, por outro lado a corrente permanecerá a mesma, considerando que estes são idênticos.

De maneira similar, a associação em paralelo dos módulos fotovoltaicos irá produzir uma elevação de corrente proporcional à quantidade de módulos dispostos em paralelo, enquanto que, a tensão permanecerá a mesma desde que os módulos sejam idênticos.

A Figura 17 representa esquematicamente a ligação em paralelo de n módulos FV.

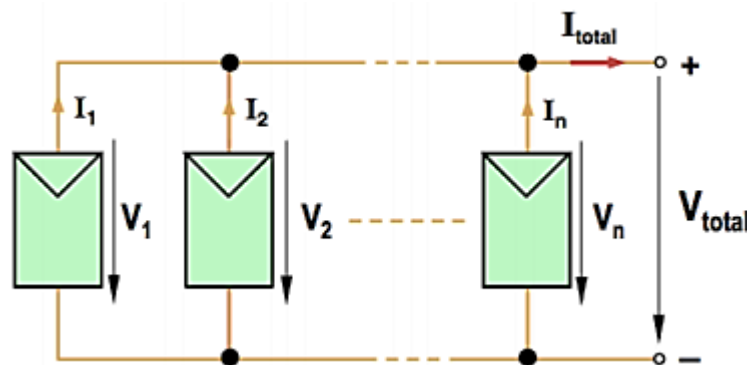


Figura 17 - Associação em paralelo de n módulos fotovoltaicos.
Fonte: [22].

$$V_{Total} = V_1 = V_2 \dots V_n = V \quad (3)$$

$$I_{Total} = I_1 + I_2 \dots + I_n = n \cdot I \quad (4)$$

Uma característica comum nos SFCR é a associação mista de módulos, este tipo de associação combina as características de associações série e paralelo, como pode ser observada na Figura 18, a associação mista de $n \times m$, onde n representa o número de fileiras de módulos associados em paralelo e m representa o número de módulos associados em série [5, 22].

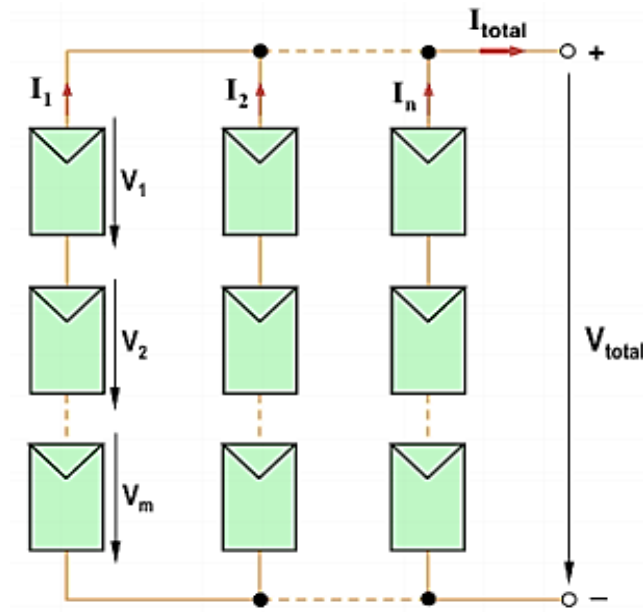


Figura 18 - Associação mista $n \times m$ módulos fotovoltaicos.

Fonte: [22].

Conforme o esquema proposto na Figura 18, cada fileira possui o mesmo valor de corrente partindo do princípio que os módulos são idênticos, assim é possível observar que a corrente neste arranjo é proporcional à quantidade de fileiras, que é determinada pela letra n .

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (5)$$

$$I_{Total} = I_1 + I_2 \dots + I_n = n \cdot I \quad (6)$$

De forma análoga a tensão em cada módulo da fileira é idêntica, assim pode-se afirmar que a tensão deste arranjo é proporcional à quantidade de módulos em uma fileira, esta quantidade de módulos é denominada pela letra m .

$$V = V_1 = V_2 \dots = V_m \quad (7)$$

$$V_{Total} = V_1 + V_2 \dots + V_m = m.V \quad (8)$$

As associações descritas acima podem ser utilizadas em células e em módulos fotovoltaicos de acordo com característica exigida, desta forma um arranjo fotovoltaico pode atender demandas variadas.

CAPÍTULO 3

MODELO MATEMÁTICO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

3.1 CIRCUITO EQUIVALENTE

Após a análise realizada no Capítulo 2 sobre a construção e funcionamento de uma célula fotovoltaica, pode-se observar que a sua junção P-N faz com que a mesma seja comparada a um diodo de maiores proporções. Para facilitar o entendimento acerca das células é utilizado um circuito equivalente de modo a simplificar a análise de sistemas FV, visto que a célula fotovoltaica é a unidade fundamental de um arranjo fotovoltaico.

Os fabricantes fornecem as principais especificações de seus módulos solares com referência nas condições padrão de teste (do inglês, *Standard Test Condition*, ou STC), que são definidas pela norma IEC 61125: 1000 W/m² de radiação solar e temperatura das células de 25° C [5, 6]. Antes de apresentar o circuito equivalente de uma célula fotovoltaica, serão listados abaixo alguns parâmetros e nomenclaturas geralmente fornecidos pelos fabricantes, que são:

Corrente de curto-circuito (I_{sc}): É o valor máximo da corrente de carga, portanto, é idêntica a corrente gerada pelo efeito fotovoltaico.

Tensão de circuito aberto (V_{oc}): É o máximo valor da tensão nos terminais do módulo fotovoltaico, quando não há nenhuma carga conectada.

Ponto de Máxima Potência (MPP): A variação da corrente em função da tensão gera uma curva I-V. O produto entre a corrente e a tensão em cada ponto desta curva fornece uma curva de potência em função da tensão P-V. Em um módulo fotovoltaico para cada dada condição climática, só existe um ponto na curva I-V onde a potência máxima pode ser alcançada. Este ponto corresponde ao produto entre a tensão de máxima potência e a corrente de máxima potência.

Tensão de Máxima Potência (V_{mpp}): Corresponde à tensão no ponto de máxima potência.

Corrente de Máxima Potência (I_{mpp}): Corresponde à corrente no ponto de máxima potência.

Temperatura Normal de Operação da Célula (NOCT): Devido o módulo trabalhar exposto a temperatura ambiente, o fabricante fornece também a temperatura de operação normal da célula (do inglês, *Normal Operating Cell Temperature*), medida com 800W/m^2 de radiação solar e temperatura ambiente de 20°C .

Fator de Forma (FF): É definido como a relação entre a potência no MPP e o produto da corrente de curto-circuito (I_{sc}) e a tensão de circuito aberto (V_{oc}). Valores usuais para células solares ficam entre 70 e 80%.

A curva característica de um módulo fotovoltaico mostra seus diversos pontos de operação, sendo plotada utilizando valores de corrente (I) em função da tensão (V), sendo denominada de curva I-V. O produto entre I e V por sua vez origina a curva P-V que é a potência (P) em função da tensão (V).

A Figura 19 representa as características dessas curvas. Como pode ser analisada, a corrente, curva em azul, possui uma característica não linear, logo a potência, curva em laranja, tem característica semelhante por ser originária do produto entre tensão e corrente.

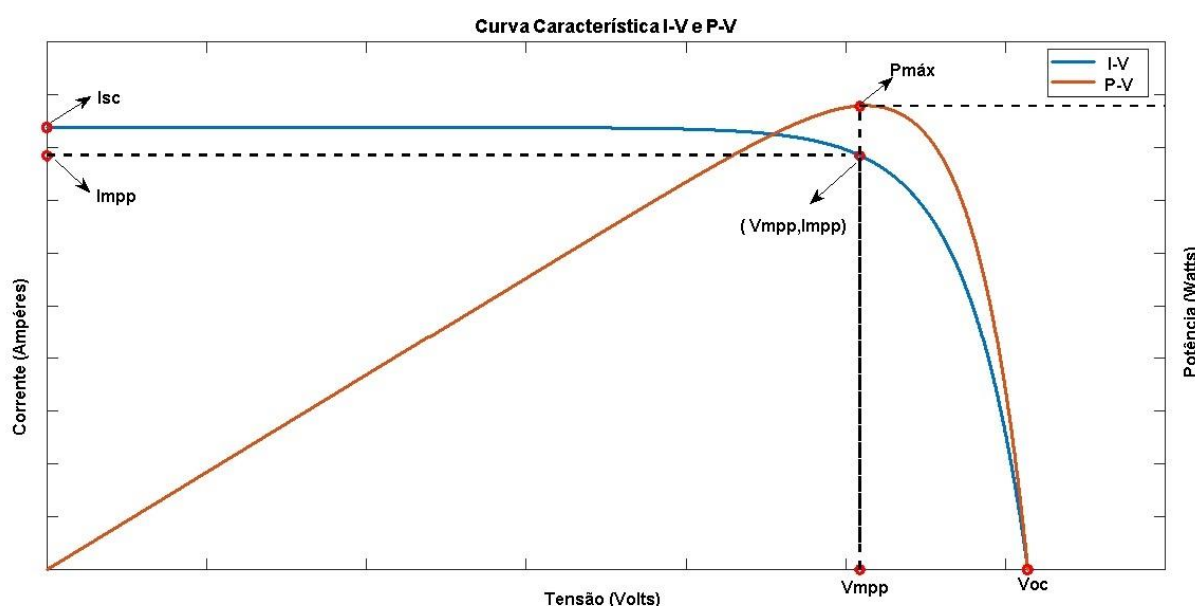


Figura 19 - Exemplo de curvas características ideais.
Fonte: [Autor].

A Figura 19 também destaca os dados fornecidos pelos fabricantes. Pode-se observar que a máxima corrente fornecida é a de curto-circuito (I_{sc}), porém, neste ponto a potência é

zero, visto que a tensão nos terminais é 0 V. De maneira análoga o ponto de tensão máxima é o de circuito aberto (V_{oc}).

O circuito equivalente de uma célula fotovoltaica, esquematizado na Figura 20 é, de forma ideal, mostrado como uma fonte de corrente em paralelo com um diodo (em pontilhado). Porém um circuito real apresenta perdas. As perdas são geralmente representadas por uma resistência R_p em paralelo e uma resistência R_s em série, sendo que estas representam respectivamente as perdas por perturbações elétricas nas extremidades da junção P-N e a queda de tensão gerada pelas perdas ôhmicas através do material semicondutor, sendo R_p geralmente muito alta, da ordem de $M\Omega$, enquanto que R_s geralmente é muito baixa, da ordem de $m\Omega$ [6].

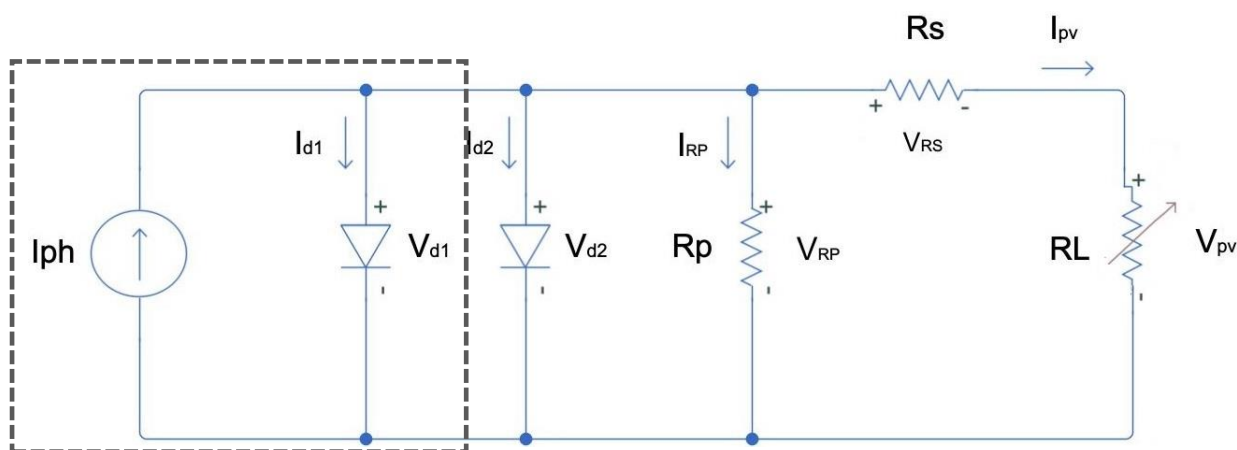


Figura 20 - Circuito equivalente completo de uma célula fotovoltaica.
Fonte: [Autor].

Na Figura 20 é apresentado o circuito equivalente completo de uma célula fotovoltaica. Este circuito considera todas as perdas com a resistência em paralelo e em série e ainda possui um segundo diodo em paralelo com a fonte de corrente I_{ph} , sendo conhecido como modelo de duas exponenciais (ou dois diodos). Esse modelo considera a corrente de recombinação ou difusão (I_R) gerada por portadores majoritários, e a corrente de deriva, que é gerada devido à recombinação de portadores minoritários na junção P-N, porém tem seu efeito minimizado com o aumento da tensão, sendo geralmente desprezado [6].

O circuito equivalente representa apenas uma célula fotovoltaica, portanto para obter o valor equivalente de tensão de saída de um módulo FV deve-se multiplicar a tensão de saída V_{pv} pela quantidade m de células associadas em série. De forma análoga deve-se multiplicar a corrente de saída I_{pv} pela quantidade n de fileiras de células em paralelo, assim como na

Figura 18 que representa uma associação mista, que pode ser utilizada tanto para módulos quanto para células FV, representados pelas equações de (5) a (8).

A linha pontilhada na Figura 20 destaca o circuito equivalente ideal, que é considerado uma boa aproximação para equacionamento. Esse circuito considera as perdas nulas, ou seja, uma resistência $R_p = \infty$ e $R_s = 0$. Nessas condições a corrente entregue a carga é dada pela expressão (9):

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D \quad (9)$$

Observa-se que, neste caso, tem-se apenas um diodo, pois o circuito equivalente é o ideal. Este diodo representa a junção P-N e a sua corrente de recombinação (I_R), porém a corrente fuga, também denominada de corrente de saturação (I_g), possui sentido oposto, neste caso a corrente no diodo é dada pela equação (10).

$$I_D = I_R - I_g \quad (10)$$

A corrente de recombinação possui uma relação exponencial com a corrente de fuga, esta relação é dada pela equação (11).

$$I_R = I_g \cdot e^{\left(\frac{V_d}{V_{tcs} \cdot A_n}\right)} \quad (11)$$

$$\text{Onde,} \quad V_{tcs} = \frac{k \cdot T_{STC}}{q} \quad (12)$$

Rearranjando (10), substituindo I_R por (11), obtém-se:

$$I_D = I_g \cdot \left[e^{\left(\frac{V_d}{V_{tcs} \cdot A_n}\right)} - 1 \right] \quad (13)$$

Em que:

I_{ph} Corrente de saída;

I_d Corrente do diodo;

I_R Corrente de recombinação;

I_g Corrente de fuga, ou de saturação;

V_{tcs} Potencial térmico em STC ;

A_n Fator de idealidade do diodo;

K Constante de Boltzman = $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{k}$;

q Carga do elétron = $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$;

T_{stc} Temperatura de referência em STC 298 k;

V_d Tensão no diodo é igual à tensão entregue a carga R_L . $V_d = V_{pv} \rightarrow$ Modelo ideal.

Com base nas equações de (9) a (13), pode-se determinar a curva I-V fornecida por uma célula fotovoltaica, utilizando métodos computacionais, como, por exemplo, o Método de Newton, método esse, que é bastante utilizado para aplicações que buscam uma solução para equações não lineares [24].

No presente caso, para utilizar o modelo computacional será considerado o funcionamento da célula fotovoltaica em duas ocasiões distintas, sendo elas em curto-circuito e circuito aberto, que representam a carga $R_L = 0$ e ∞ respectivamente. O primeiro caso é demonstrado na Figura 21.

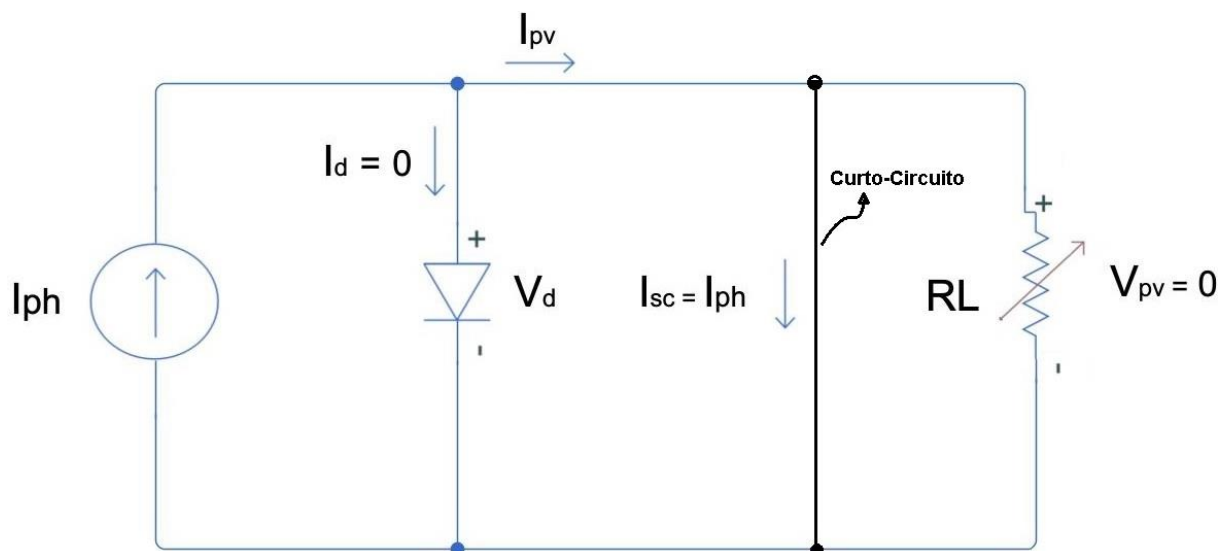


Figura 21 - Circuito equivalente da célula com terminais em curto.
Fonte: [Autor].

De acordo com o esquema da Figura 21 observa-se que a corrente I_{pv} percorre o caminho que lhe oferece menor resistência, sendo assim, a corrente gerada pela célula irá passar pelo curto-circuito. Portanto, as correntes I_{ph} , I_{sc} e I_{pv} são idênticas nessa condição, enquanto a corrente I_D e a tensão V_{pv} são nulas.

No outro caso considera-se célula fotovoltaica em uma condição de circuito aberto, a qual é demonstrada na Figura 22.

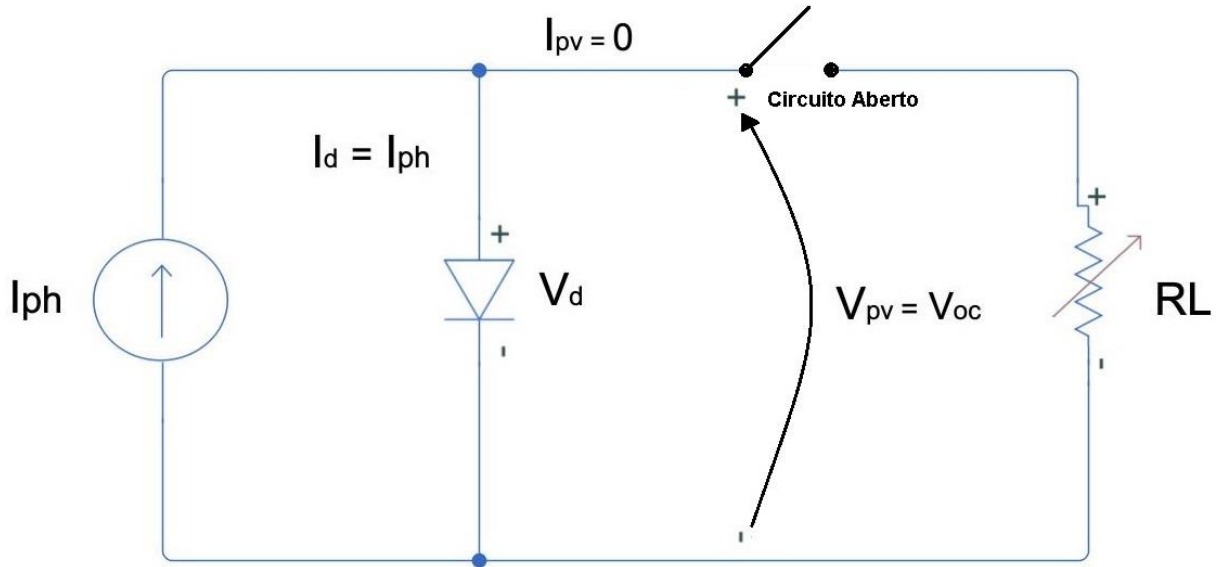


Figura 22 – Circuito equivalente com os terminais abertos.
Fonte: [Autor].

Conforme o circuito representado na Figura 22 em condições de circuito aberto a tensão V_{pv} é igual à V_{oc} , enquanto $I_D = I_{ph}$, pois com o circuito aberto a corrente não se divide entre o diodo e a carga, visto que, com o circuito aberto a fonte enxerga uma carga com resistência infinita, portanto devido a condição de curto anterior podemos afirmar também que a corrente I_{ph} é igual a corrente de curto I_{sc} .

Assim é possível substituir esta afirmação em (13) determinando a equação (14).

$$I_{sc} = I_g \cdot \left[e^{\left(\frac{V_{oc}}{V_{tcs} \cdot An} \right)} - 1 \right] \quad (14)$$

A potência máxima é obtida quando $dp/dv = 0$, sendo o ponto de máxima potência quando o par ordenado (V_{pv}, I_{pv}) assume os valores de tensão de máxima potência e corrente de máxima potência (V_{mpp}, I_{mpp}) :

$$I_{mpp} = \underbrace{I_{ph}}_{I_{sc}} - I_g \cdot \left[e^{\left(\frac{V_{mpp}}{V_{tcs} \cdot An} \right)} - 1 \right] \quad (15)$$

Dividindo (15) por (14) têm-se:

$$\frac{I_{mpp}}{I_{sc}} = \frac{I_{sc}}{I_{sc}} - \frac{I_g \cdot \left[e^{\left(\frac{V_{mpp}}{V_{tcs} \cdot An} \right)} - 1 \right]}{I_g \cdot \left[e^{\left(\frac{V_{oc}}{V_{tcs} \cdot An} \right)} - 1 \right]} \quad (16)$$

Rearranjando a equação (16) têm-se:

$$\frac{\left[e^{\left(\frac{V_{mpp}}{V_{tcs} \cdot An} \right)} - 1 \right]}{\left[e^{\left(\frac{V_{oc}}{V_{tcs} \cdot An} \right)} - 1 \right]} = 1 - \frac{I_{mpp}}{I_{sc}} \quad (17)$$

Em (17), alguns termos são constantes e serão renomeados com intuito de facilitar a utilização destas equações, visto que o objetivo é encontrar uma equação que possa ser utilizada em métodos computacionais.

$$C1 = \frac{V_{mpp}}{V_{tcs}} ; \quad C2 = \frac{V_{oc}}{V_{tcs}} ; \quad C3 = 1 - \frac{I_{mpp}}{I_{sc}}$$

O fator de idealidade é constante independente da condição climática. Geralmente adota-se valores entre 1 e 2 para células de silício [8]. Será utilizado seu valor inverso.

$$Ainv = \frac{1}{An}$$

Utilizando as considerações acima e substituindo-as em (17) têm-se:

$$e^{C1 \cdot Ainv} - 1 = C_3 \cdot e^{C2 \cdot Ainv} - C_3 \quad (18)$$

Rearranjando (18) têm-se:

$$f(Ainv) = e^{C1 \cdot Ainv} - C_3 \cdot e^{C2 \cdot Ainv} + C_3 - 1 = 0 \quad (19)$$

Essa equação não linear em função do inverso do fator de idealidade (A_n) pode ser solucionada através do Método de Newton, utilizando aproximações pela reta tangente, por isso utiliza-se a derivada da função, representada em (20). Esse método será explicado com maiores detalhes no Apêndice A. Por hora deve-se interpretar o fluxograma utilizado para a representação do método computacional (O código completo consta no Apêndice A).

$$f'(A_{inv}) = C_1 \cdot e^{C_1 A_{inv}} - C_2 C_3 \cdot e^{C_2 A_{inv}} \quad (20)$$

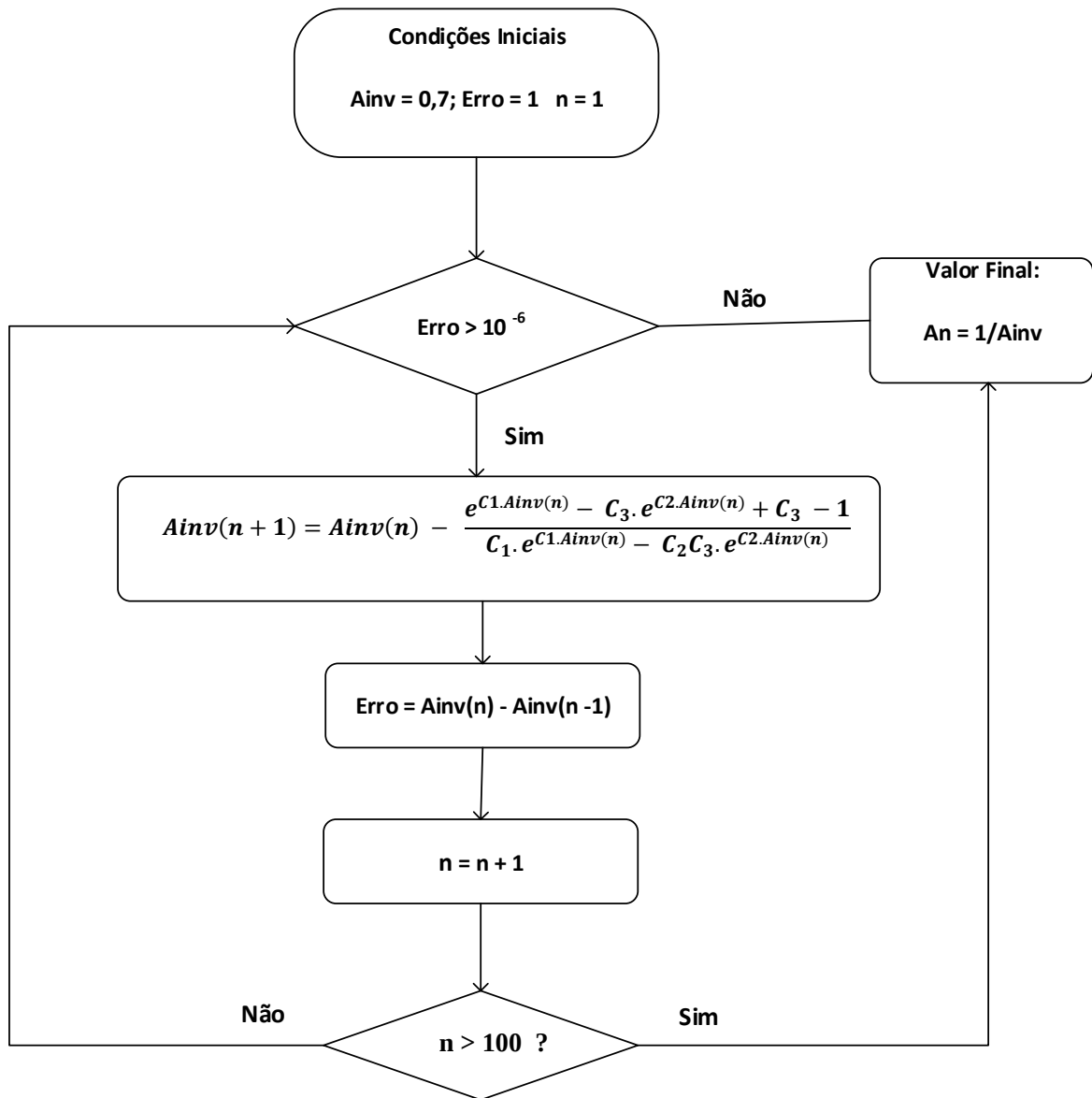


Figura 23 – Fluxograma para utilização do método de Newton.
Fonte [Autor].

Conforme o esquema da Figura 23 observa-se que o método utilizado depende de condições iniciais determinadas pelo usuário, onde n é o número de iterações, também se utiliza a derivada da função representada por (20). O Erro é um critério de parada, assim como o número de iterações (n), determinando quando o *loop* (laço de repetição) deverá terminar.

Sendo assim, para realizar a caracterização de curvas de um módulo fotovoltaico com um modelo computacional, basicamente deve-se seguir o fluxograma da Figura 23, utilizando os dados fornecidos pelo fabricante, para condições STC.

O esquema utilizado até o momento refere-se às condições em STC de irradiação e temperatura, porém em condições reais, tanto a temperatura quanto a irradiação podem variar de acordo com a sazonalidade da região. Dessa maneira o modelo computacional deve representar o comportamento da curva característica em condições fora do STC. Em geral os fabricantes fornecem coeficientes de correção oriundos de avaliações experimentais [5, 21].

Esses coeficientes são específicos para V_{oc} , I_{sc} e $P_{máx}$, sendo denominados por β_T , α_T e γ_T respectivamente [24]. De posse dos coeficientes de correção e das equações vistas até o momento, pode-se calcular a tensão e corrente de saída de um módulo fotovoltaico [5, 6, 23]. A corrente de saída I_{ph} , possui uma relação de proporcionalidade com a irradiância e uma variação muito pequena em relação à temperatura, representada pela equação (21).

$$I_{ph}(E, \Delta T) = \frac{E}{E_{STC}} \times I_{SCS} \cdot (1 + \alpha_T \cdot \Delta T) \quad (21)$$

Em que:

E	Irradiância da célula em W/m ² ;
E_{STC}	Irradiância em STC em W/m ² ;
α_T	Coeficiente de correção de temperatura para I_{scs} . Geralmente é fornecido em %/°C;
$\Delta T = T_C - T_{STC}$	Variação de temperatura entre a temperatura da célula (T_C) e a temperatura em STC que é 298 K, ou 25° C;
I_{SCS}	Corrente de curto-circuito em STC.

A corrente de fuga I_g , não depende da irradiação, pois a sua variação se dá de acordo com a temperatura do módulo, sendo representada pela equação descrita abaixo.

$$I_g(\Delta T) = I_{gSTC} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{STC}} \right)^3 \cdot e^{\left(\frac{E_g \cdot q}{An \cdot k} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_{STC}} \right) \right)} \quad (22)$$

Rearranjando a equação (13), lembrando que em condições de circuito aberto $I_d = I_{ph}$, obtêm-se V_{oc} em função da irradiação e da temperatura.

$$V_{oc}(E, \Delta T) = V_{tc} \cdot An \cdot \ln \left[\frac{I_{ph}(E, \Delta T)}{I_g(\Delta T)} + 1 \right] \quad (23)$$

Onde V_{tc} origina-se da equação (12), porém fora do STC, ou seja, considerando a temperatura do módulo ao invés da temperatura de teste padrão.

Seguindo este raciocínio ao se calcular I_{ph} e V_{oc} em função da irradiação e temperatura, pode-se encontrar I_{pv} e determinar os pontos (V_{pv} , I_{pv}). Rearranjando a equação (9) tem-se:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_g \cdot \left[e^{\left(\frac{V_{oc}}{V_{tc} \cdot An} \right)} - 1 \right] \quad (24)$$

De acordo com as equações (22) a (24) podem-se realizar os cálculos através de um programa computacional para cada condição de temperatura e irradiação. O fluxograma da Figura 24 resume o programa computacional desenvolvido considerando a variação de temperatura e da irradiação.

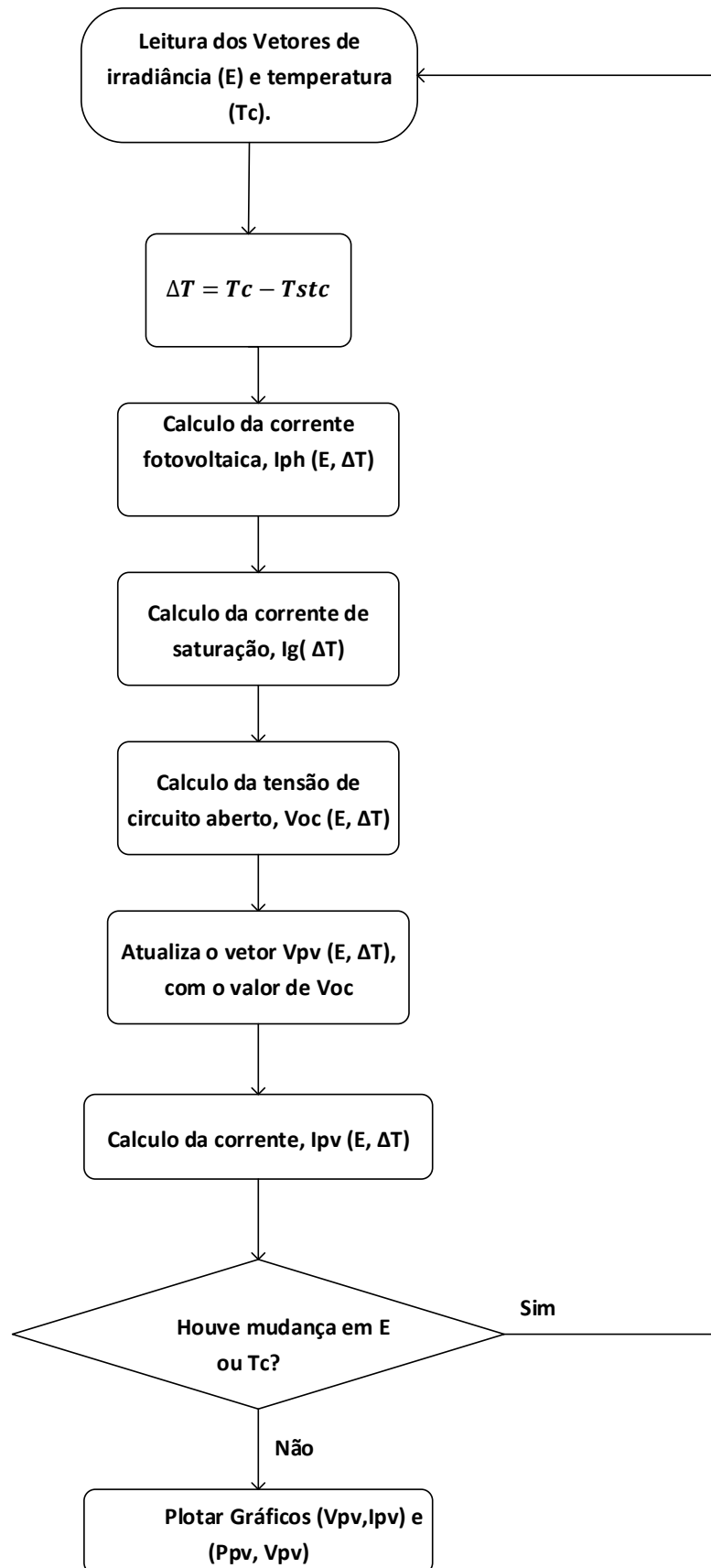


Figura 24 – Fluxograma para simulação variando irradiação e temperatura.
Fonte [Autor].

Seguindo o fluxograma da Figura 24, deve-se considerar o fator de idealidade (A_n) constante. Nesse caso utiliza-se o valor encontrado para as condições em STC. Os gráficos oriundos de uma simulação computacional que considera as variações de radiação e temperatura são similares ao gráfico da Figura 19, entretanto, os pontos principais como I_{sc} e V_{oc} , sofrem mudanças que interferem diretamente na potência de saída. As Figuras 25 e 26 mostram a influência da variação de irradiação e temperatura.

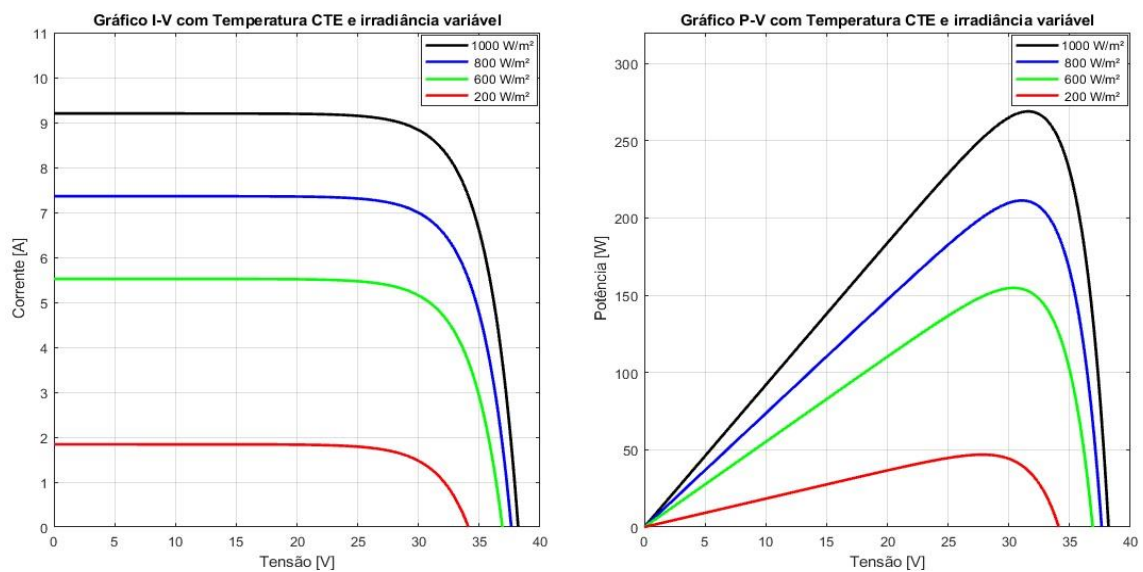


Figura 25 – Exemplo do efeito da variação da irradiação com temperatura CTE.
Fonte (autor).

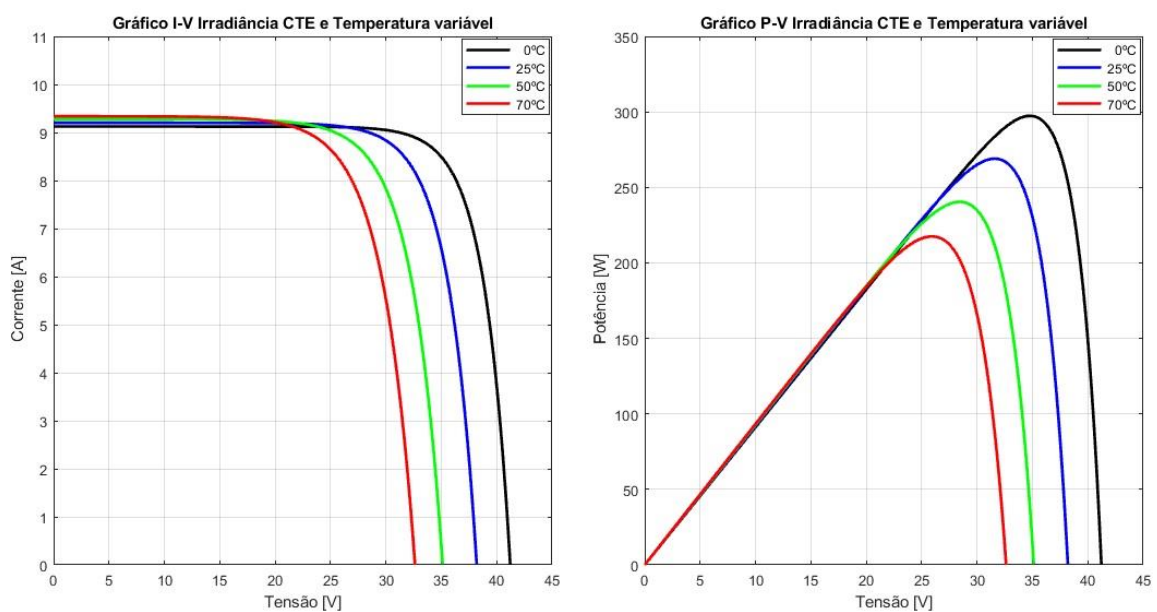


Figura 26 – Exemplo do efeito da variação da temperatura com a irradiação CTE.
Fonte [Autor].

Os dados utilizados para a simulação foram retirados do catálogo do módulo FV fabricado pela Risen Energy que possui as características descritas na Tabela 1 [25].

Tabela 1 - Características do módulo FV utilizado para simulação. Fonte [25]

Modelo	P _{máx}	V _{mpp}	I _{mpp}	V _{oc}	I _{sc}	β_T	α_T	γ_T
RM60-6-270P	270	31,2	8,66	38,2	9,2	-0,33%/°C	0,033%/°C	-0,39%/°C

A análise dos gráficos nas Figuras 25 e 26 possibilitam enumerar alguns comportamentos dos módulos fotovoltaicos. Em relação à irradiação destacam-se:

- A tensão de circuito aberto pouco varia com a irradiação, sendo essa variação mais significativa para valores muito baixos de irradiação;
- A potência máxima aumenta com o aumento da irradiação;
- A corrente de curto-circuito aumenta com o aumento da irradiação (varia aproximadamente de forma linear).

Em relação ao efeito da temperatura destacam-se:

- A tensão de circuito aberto decresce com o aumento da temperatura;
- A potência máxima aumenta com a diminuição da temperatura;
- A corrente de curto circuito aumenta muito pouco com o aumento da temperatura, sendo este efeito desprezado.

Frente ao exposto, tanto a temperatura quanto a irradiância influenciam diretamente no ponto de máxima potência. Enquanto a diminuição da irradiação causa um deslocamento para baixo do ponto de máxima potência, o aumento da temperatura causa um deslocamento para a esquerda devido ao decrescimento da tensão de circuito aberto. O aumento de temperatura também provoca deslocamento para baixo do ponto de máxima potência, porém esse é menos significativo do que o da diminuição da irradiação [5, 21].

CAPÍTULO 4

CONSTRUÇÃO DO CARACTERIZADOR FOTOVOLTAICO

4.1 MÉTODO UTILIZADO E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O caracterizador fotovoltaico basicamente simula para o módulo FV uma carga que varia entre curto-circuito ($R_L = 0$) e circuito aberto ($R_L = \infty$), sendo realizada nesse intervalo de tempo a aquisição de dados do painel, neste caso corrente e tensão, possibilitando traçar as curvas I-V e P-V, conhecidas como curvas características de módulos fotovoltaicos.

O projeto de um caracterizador fotovoltaico depende de diversos fatores, dentro os quais se destaca o método utilizado, como foi mencionado no Capítulo 1.

Existem vários métodos para caracterização de painéis fotovoltaicos, como: resistência variável, carga capacitiva, conversor estático CC-CC e da carga eletrônica, sendo este último o método utilizado nesse projeto.

O método da carga eletrônica consiste em utilizar um transistor de potência como carga, em geral utiliza-se um MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*). Esse método possui como vantagem a simplicidade e baixo custo, em contrapartida o MOSFET deverá dissipar toda a potência do módulo, assim esse método se limita para aplicações com poucos módulos FV [23]. Frente ao exposto, serão explanados de maneira sucinta os conceitos referentes ao MOSFET, que é o elemento principal utilizado no método da carga eletrônica.

O MOSFET possui três terminais, que são: Dreno/*Drain* (D), Porta/*Gate* (G) e Fonte/*Source* (S), esse componente pode ser encontrado com dois tipos de construção, que são: canal N (NMOS) e canal P (PMOS), cuja diferença consiste no material utilizado. O NMOS possui a região de *drain* e *source* constituídas de material do tipo N, enquanto o PMOS possui essas regiões constituídas de material do tipo P. O tipo de MOSFET utilizado nesse projeto é o NMOS, que possui a simbologia usual mostrada na Figura 27.

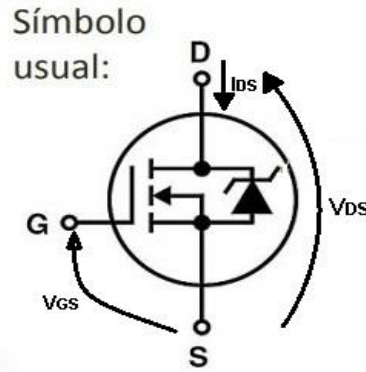


Figura 27 - Simbologia Usual do Mosfet NMOS.
Fonte adaptada: [26].

Diferente do Transistor Bipolar de Junção (TBJ) o MOSFET é controlado pela tensão V_{GS} ao invés da corrente na base e possui o terminal de *Gate* isolado fisicamente dos terminais de *drain* e *source*, como se pode observar na Figura 27. A tensão V_{GS} deve ser maior do que a tensão de limiar também conhecida como *Threshold Voltage* (V_t), para que o MOSFET conduza corrente I_{DS} , caso contrário diz-se que o MOSFET está em corte e $I_{DS} = 0$.

Dentro desse contexto o MOSFET possui 3 regiões de operação, basicamente as tensões V_{GS} , V_{DS} e V_t determinam em qual região o MOSFET está operando. A Figura 28 demonstra as curvas de operação do MOSFET e divide suas regiões.

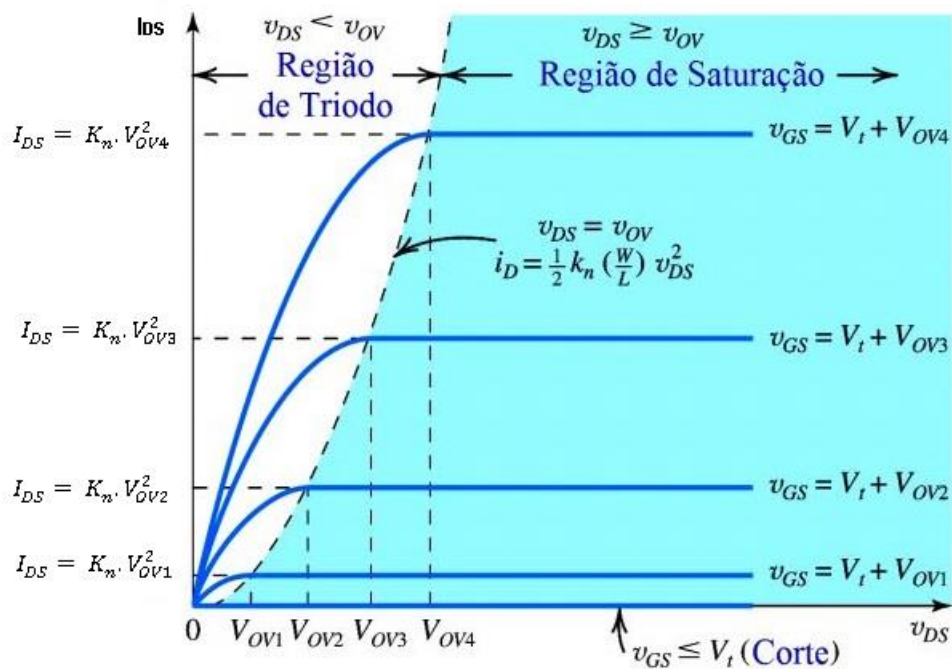


Figura 28 - Regiões de Operação do MOSFET.
Fonte adaptada: [26].

Conforme se observa no gráfico da Figura 28, mantendo o V_{DS} com um valor fixo e variando a tensão V_{GS} acima da tensão de limiar (V_t) obtêm-se várias curvas de operação do MOSFET. Essas curvas possuem suas regiões bem definidas que são: triodo ou linear, saturação e a região de corte que ocorre quando a tensão *gate-source* (V_{GS}) é menor que V_t .

As regiões definidas na Figura 28 serão explicadas abaixo com o auxílio de algumas equações que não serão demonstradas visto que o intuito é apenas interpretar o comportamento das regiões de operação do MOSFET.

- **Região de Corte** – Nessa região o MOSFET se comporta como uma chave aberta, ou seja, sua resistência é infinita e I_{DS} é nula. A equação (25) impõe ao MOSFET esta região de operação.

$$V_{GS} \leq V_t \quad (25)$$

- **Região Linear/Triodo** – Nessa região o MOSFET se comporta como uma resistência variável. Para que o transistor entre nessa região é necessário atender aos seguintes requisitos:

$$V_{GS} > V_t \text{ e } V_{DS} \leq V_{GS} - V_t \quad (26)$$

Nesse caso, a corrente I_{DS} se comportará de forma linear, sendo representada pela equação (27).

$$I_{DS} = Kn \cdot \left(V_{OV} - \frac{1}{2} V_{DS} \right) \cdot V_{DS} \quad (27)$$

Entretanto, para valores de V_{DS} muito pequenos a equação (27) pode ser simplificada de acordo com (28).

$$I_{DS} = Kn \cdot V_{OV} \cdot V_{DS} \quad (28)$$

Onde,

$$K_n = \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \left(\frac{w}{L}\right) \quad (29)$$

$$V_{OV} = V_{GS} - V_t \quad (30)$$

μ_n	Mobilidade dos elétrons;
C_{ox}	Capacitância do Óxido por unidade de comprimento;
w	Largura do Canal;
L	Comprimento do Canal;
V_{OV}	Tensão de <i>Overdrive</i> , conhecida como V_{DS} de saturação;
K_n	Transcondutância do MOSFET.

- **Região de Saturação** – A corrente satura, ou seja, o canal do MOSFET está aberto para a sua máxima corrente. Para trabalhar na região de saturação o MOSFET deve atender aos seguintes requisitos:

$$V_{GS} > V_t \quad e \quad V_{DS} \geq V_{OV} \quad (31)$$

Nesse caso, a corrente I_{DS} se comporta conforme a seguinte equação:

$$I_{DS} = K_n \cdot V_{OV}^2 \quad (32)$$

Já esclarecido o funcionamento do MOSFET, pode-se fazer um comparativo entre as curvas de operação do MOSFET e a curva característica I-V dos módulos fotovoltaicos. A Figura 29 abaixo demonstra as curvas de operação do MOSFET com as intersecções da curva característica de um módulo, ambas são curvas genéricas para exemplificar o método.

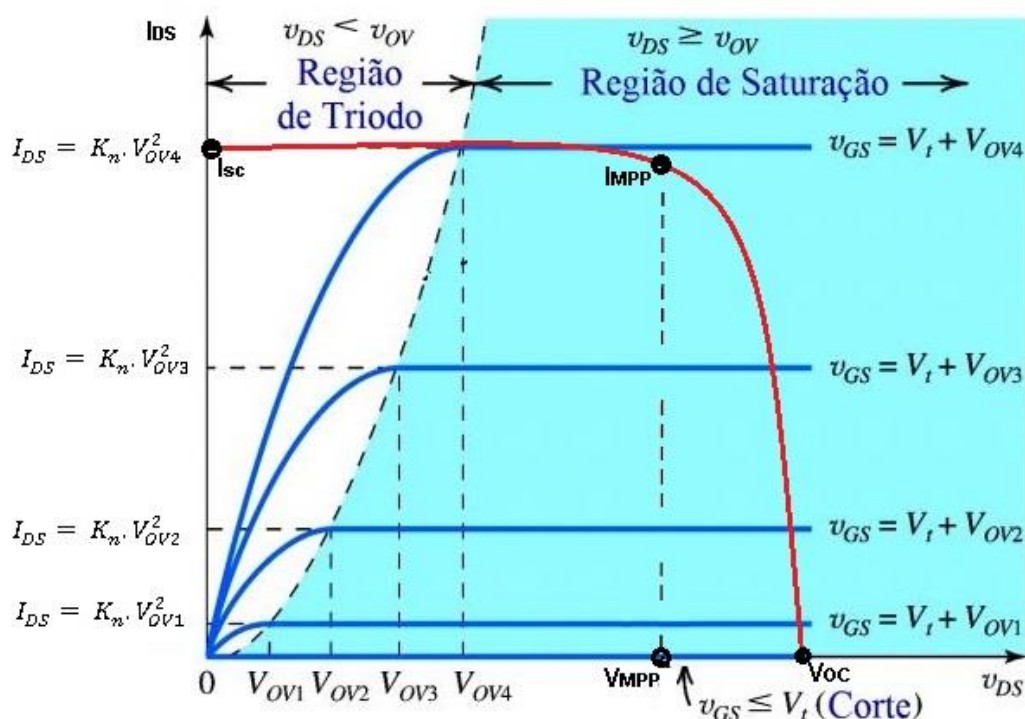


Figura 29 – Curvas de Operação do MOSFET (em azul) e curva característica de um painel (em vermelho). Fonte adaptada: [26].

Como pode ser observado na Figura 29 a curva característica de um módulo FV possui intersecções com as curvas de operação do MOSFET, logo é possível perceber que controlando a tensão *gate-source* (V_{GS}), obtêm-se várias intersecções entre as curvas, ou seja, se essa variação for feita de maneira rápida para que não haja variação de temperatura e irradiância no módulo, é possível realizar a caracterização do módulo FV.

4.2 CIRCUITOS E COMPONENTES UTILIZADOS

Com as características do MOSFET demonstradas, as quais viabilizam o seu uso para a caracterização de um módulo FV, serão apresentados os circuitos auxiliares utilizados para que o transistor de potência trabalhe entre a região de saturação e corte no período de tempo suficiente para que seja realizada a aquisição dos dados de tensão e corrente do módulo.

O protótipo do caracterizador fotovoltaico construído consiste dos seguintes itens:

- Fonte simétrica ± 15 Volts.
- Placa condicionadora de sinais com sensores de efeito Hall.
- Circuito auxiliar para controle do MOSFET, utilizando o Circuito Integrado (CI) ULN203A.
- Arduino Uno ATmega328.

O primeiro item do projeto é uma fonte simétrica ± 15 Vcc necessários para alimentação dos circuitos auxiliares e principalmente para os sensores de efeito Hall utilizados na placa de condicionamento de sinais. Para a fabricação da fonte simétrica foram utilizados os seguintes componentes:

- 01 Transformador com tap central 24 + 24 V, bivolt, 2 A;
- 01 Regulador de Tensão 7815 (+) 15 Vcc;
- 01 Regulador de Tensão 7915 (-) 15 Vcc;
- 04 Diodos 1N4007;
- 01 Diodo Emissor de Luz. LED;
- 02 Capacitor Eletrolítico 2200 μ F, 35 V;
- 02 Capacitor Cerâmico 100 nF, 50 V;
- 02 Conectores Tipo Borne, KRE 3 vias.

O transformador abaixa a tensão da rede elétrica, os diodos formam uma ponte retificadora de onda completa, enquanto os capacitores eletrolíticos controlam a tensão e os reguladores 7815 e 7915, por sua vez limitam a tensão em +15 e -15 Vcc respectivamente, já os capacitores cerâmicos são responsáveis por filtrar ruídos.

A utilização de um transformador com tap central possibilita o uso do mesmo como referência para as tensões de +15 e -15 Vcc. A Figura 30 demonstra o diagrama esquemático do circuito utilizado.

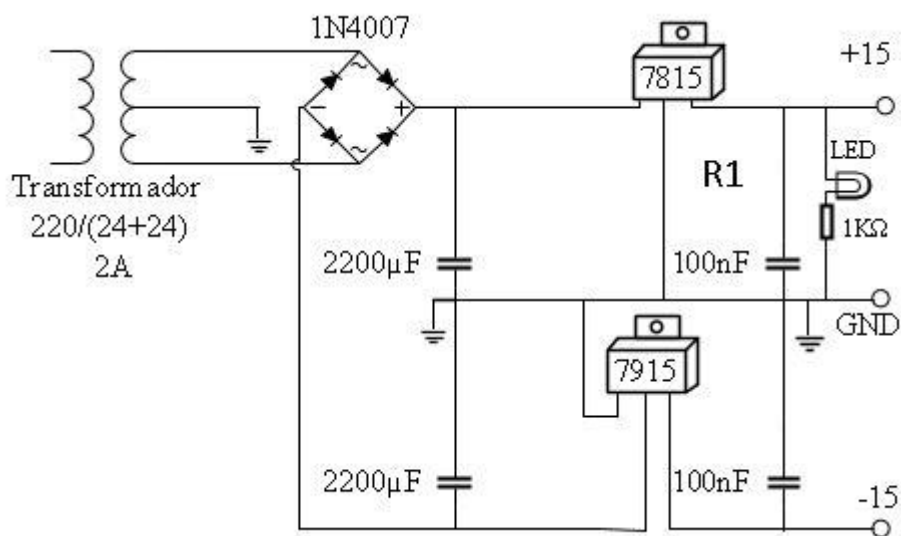


Figura 30 - Esquema Fonte Simétrica. Fonte: [Autor].

Esse diagrama foi simulado no Software Isis Professional (PROTEUS), em seguida foi criado, com o auxílio da ferramenta Ares, o *layout* para a fabricação da placa de circuito impresso, esse layout possui trilhas responsáveis pela interligação dos componentes na placa. A Figura 31 mostra o layout esquemático da fonte simétrica.

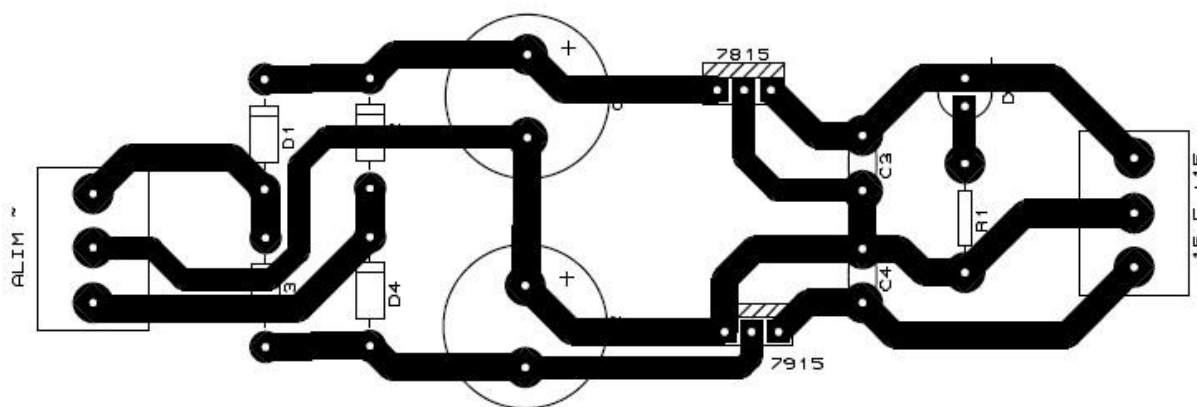


Figura 31- Layout Fonte Simétrica. Fonte [Autor].

Com esse *layout* foi possível realizar a transferência do circuito projetado para uma placa de fenolite, a qual foi devidamente perfurada para posterior soldagem dos componentes citados acima. A Figura 32 mostra a fonte construída.



Figura 32 - Fonte simétrica. Fonte [Autor].

O próximo item do projeto a ser descrito é a placa de condicionamento de sinais, que utiliza dois sensores de efeito Hall, o sensor LV 20 – P para medição de tensão e o sensor LA 55 – P para medição de corrente. Segundo [27] e [28] esses componentes possuem as seguintes características:

- Sensor LV 20 – P
 - Alimentação $\pm 12\text{ Vcc}$ até $\pm 15\text{ Vcc}$;
 - Corrente nominal no primário I_{PN} 10 mA;
 - Tensão Nominal no primário V_{PN} 10 até 500 V;
 - Temperatura de operação $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 - Fator de conversão proporcional 2500:1000.

- Sensor LA 55 – P
 - Alimentação $\pm 12\text{ Vcc}$ até $\pm 15\text{ Vcc}$;
 - Corrente nominal no primário I_{PN} 50 A;
 - Corrente nominal no secundário I_{SN} 50 mA;
 - Temperatura de operação -40 a $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 - Fator de conversão proporcional 1:1000.

Esses sensores de efeito Hall são os principais responsáveis pela aquisição de dados de tensão e corrente, ambos reproduzem em seu secundário a forma de onda do primário independente de ser alternada, contínua ou de possuir distorção harmônica, portanto esses sensores são ideais para medição de corrente e tensão, pois possuem robustez e precisão em sua medição.

Dessa forma, a aquisição de tensão feita pelo sensor Hall LV 20 – P necessita de uma resistência externa (R_{ext}) para limitar o valor de corrente no primário do sensor, sendo que, quanto mais próxima da corrente nominal melhor é a precisão do sensor. Como a corrente nominal deste sensor é $I_{PN} = 10 \text{ mA}$ e um módulo FV possui uma tensão de curto circuito de aproximadamente 40 V, para determinar a resistência externa a ser utilizada foi realizado o seguinte cálculo:

$$V = R \cdot I$$

$$40 = R_{ext} \cdot 10 \text{ mA}$$

$$R_{ext} = 4 \text{ K}\Omega$$

Dessa maneira foi escolhida uma resistência de 4,7 K Ω /2W, que se aproxima da resistência calculada fornecendo assim uma corrente no primário do sensor próxima ao seu valor máximo, quando a tensão do módulo for a máxima. A Figura 33 mostra o esquema de ligação do resistor no sensor Hall de tensão LV 20 – P.

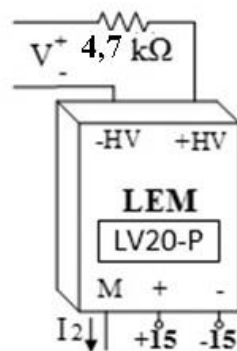


Figura 33 - Entrada de tensão no sensor Hall. Fonte adaptada: [29].

O sensor Hall de corrente LA 55-P, por outro lado, não necessita de uma resistência externa, entretanto por possuir um fator de conversão proporcional de 1:1000, foram utilizadas 4 voltas no enrolamento primário do sensor, aumentando o fator de conversão para

4:1000, melhorando a precisão do sensor na leitura de correntes pequenas da ordem de miliamperes, em contrapartida o transdutor abaixa o *range* de medição em 4 vezes, pois quando passar 12,5 A em seu primário serão vistos no secundário como 50 mA, que é a sua corrente nominal I_{SN} .

A Figura 34 mostra a placa de aquisição utilizada nesse projeto. Essa placa foi elaborada pelo Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) em 2009. No circuito é possível ver os sensores LV 20-P e LA 55-P, dentre outros componentes como: capacitores, amplificadores operacionais, resistores e reguladores de tensão utilizados no processo de condicionamento de sinais. A alimentação é feita com ± 15 V e o GND da fonte simétrica, as saídas de tensão e corrente são valores proporcionais de tensão, logo não se deve confundir as nomenclaturas V_Placa e I_Placa, pois ambas são valores de tensão proporcionais às entradas de uma tensão e corrente respectivamente.

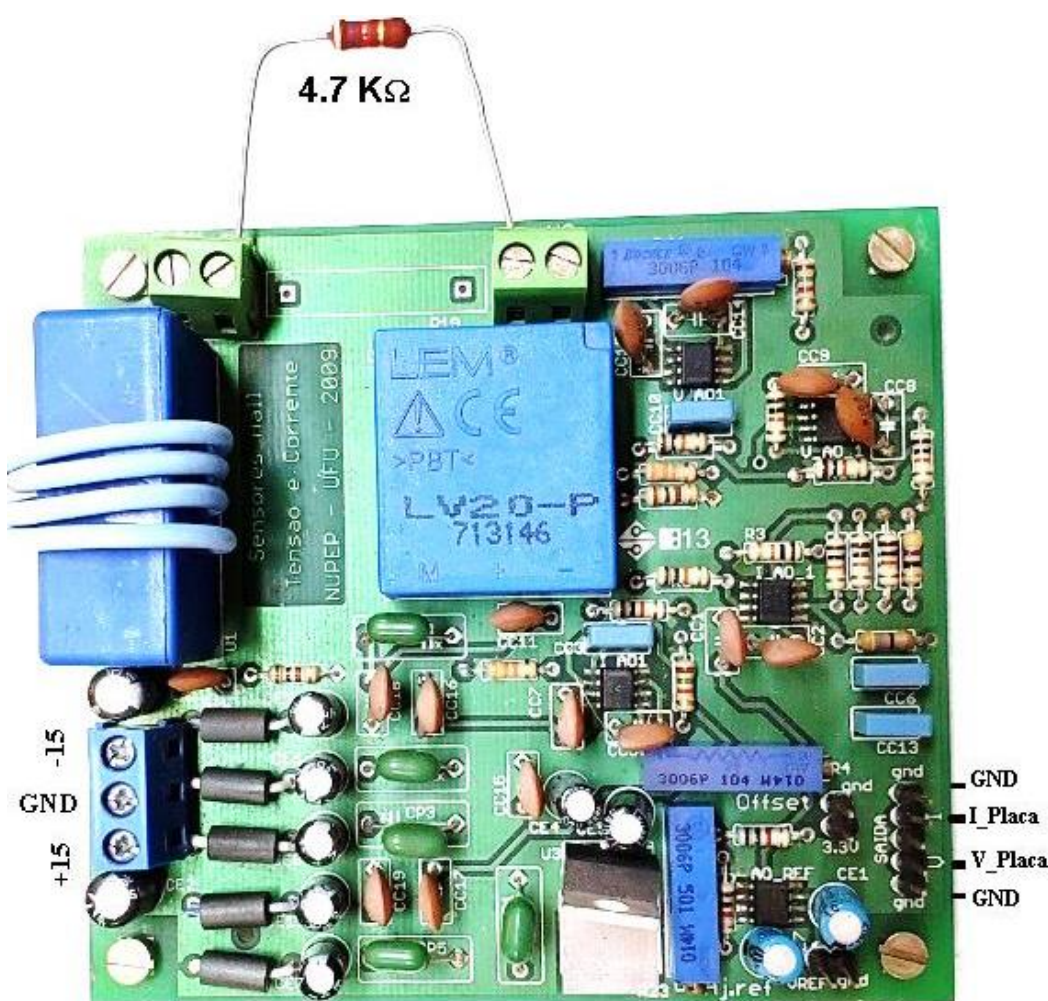


Figura 34 - Placa de Condicionamento de Sinais.

Essa placa de condicionamento de sinais possui como característica a variação de tensão na saída de 0 a 3,3 V equivalentes aos valores medidos nos sensores Hall. Possui, também, potenciômetros de offset para ajuste da tensão de saída nos pinos referentes a tensão e corrente.

O próximo circuito apresentado é o responsável pelo comando do MOSFET e utiliza os seguintes componentes:

- 01 MOSFET de potência IRFP260N;
- 01 CI transistorizado ULN2003A;
- 01 Capacitor de 1000 μ F, 25V;
- 01 Diodo 1N4007;
- 03 Resistor de 1 K Ω ;
- 01 Resistor de 4,7 K Ω ;
- 01 Resistor de 100 Ω ;
- 04 Bornes KRE, 2 Vias.

O MOSFET utilizado foi escolhido devido a sua capacidade de dissipar uma potência de até 280 W, de conduzir correntes próximas de 46 A, de suportar tensões de V_{DS} e V_{GS} de até 200 V e 20 V respectivamente e também possuir uma resistência de *drain-source* pequena da ordem de 55 m Ω . Essa resistência deve ser muito pequena para que não haja interferência na medição da corrente de curto circuito do módulo FV [23, 30].

O CI transistorizado foi escolhido pela capacidade de isolar o sinal de controle enviado pelo Arduino do sinal de potência do MOSFET. Esse CI tem a característica de aumentar e diminuir a impedância da porta de saída, liberando ou bloqueando a passagem de corrente e possui também uma alimentação de +15 Vcc [31]. A Figura 35 mostra a forma de ligação do circuito de comando.

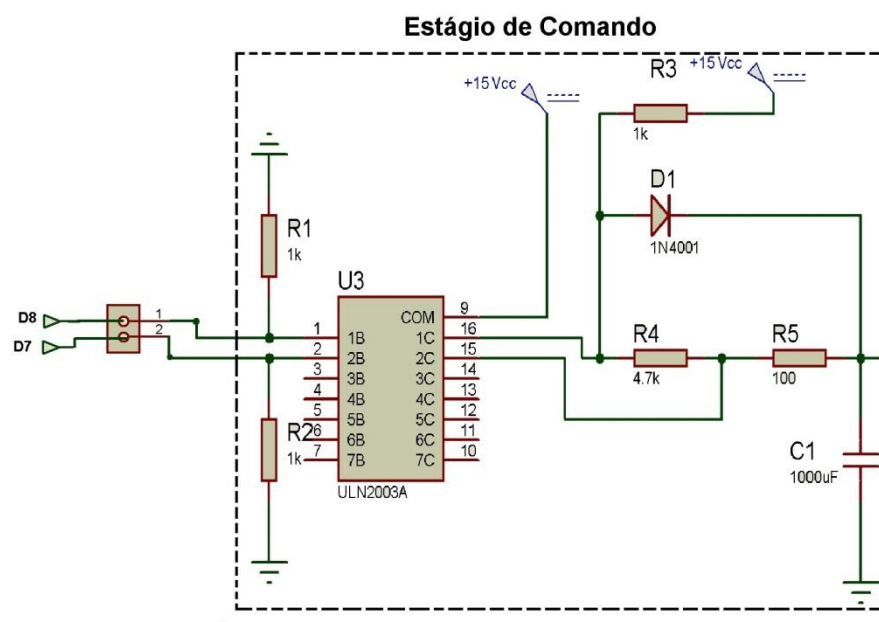


Figura 35 - Circuito do Estágio de Comando. Fonte [Autor].

O circuito de comando foi fabricado de maneira similar à fonte simétrica, utilizando um *layout* das trilhas do circuito que em seguida foi passado para uma placa de fenolite como demonstrado nas Figuras 36 e 37 abaixo.

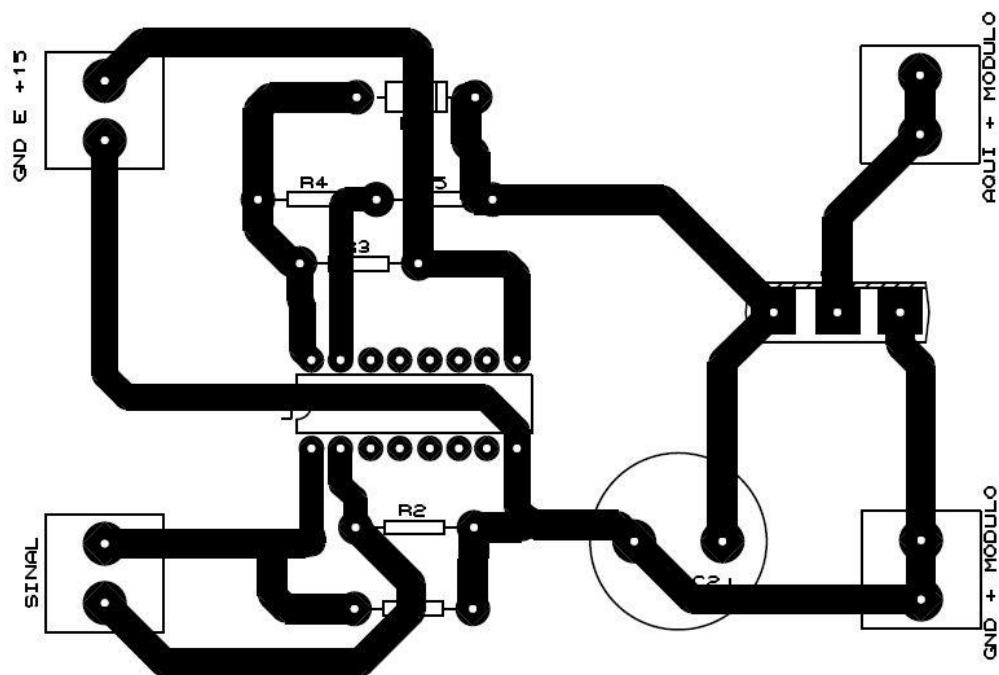


Figura 36 – Layout do Circuito de Comando. Fonte [Autor].

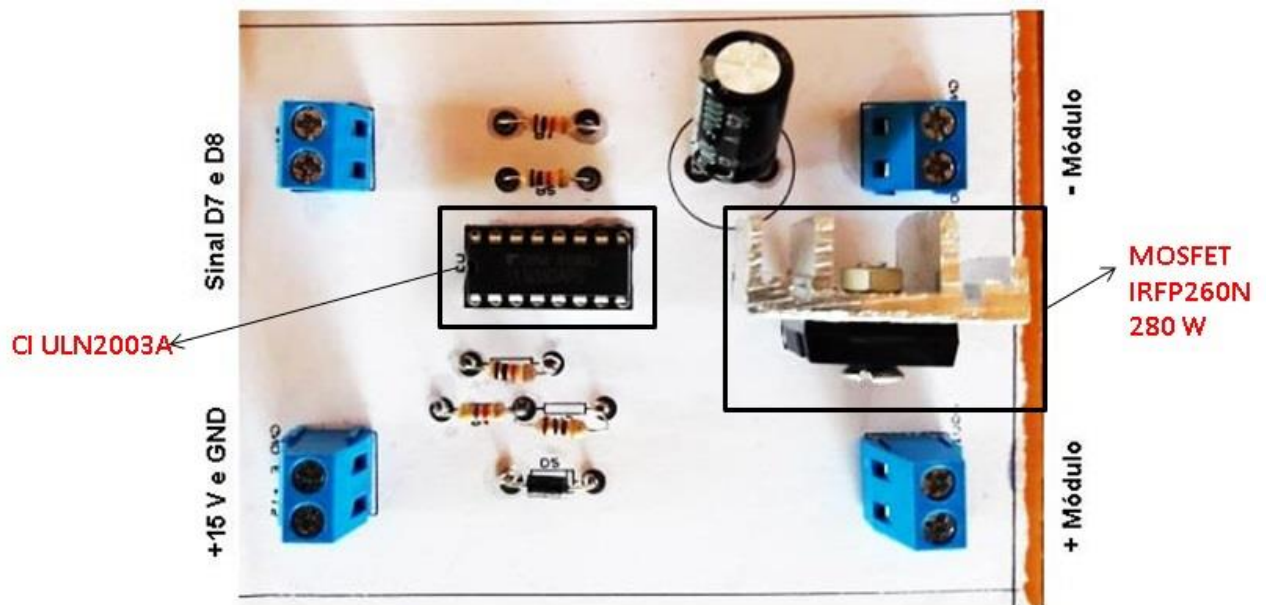


Figura 37 - Circuito de comando construído. Fonte [Autor].

As Figuras 35 e 37 acima mostram o circuito de comando utilizado, os pinos D7 e D8 estão ligados ao Arduino Uno que é responsável por comandar o ULN2003A e também fazer a aquisição de dados da placa de condicionamento de sinais. O Arduino *Uno* possui algumas características que valem ser destacadas nesse projeto, que são:

- Microcontrolador ATmega328;
- Tensão de Operação 5 V, conectado ao USB(*Universal Serial Bus*) do computador;
- 14 pinos I/O, sendo que 6 podem ser usados com PWM;
- 06 pinos de entrada analógica;
- Conversor A/D 10 bits;
- *Clock* de 16 MHz;
- Comunicação USB.

O princípio de funcionamento do circuito de comando é descrito abaixo:

- Se os pinos D7 e D8 estiverem em nível lógico baixo (0 V), o capacitor (C1) de 1000 µF irá carregar através do resistor (R3) de 1 KΩ e do diodo 1N4007 (D1), alcançando valores de ensaio de aproximadamente 15 Volts, que é um V_{GS}

suficiente para colocar o MOSFET na região de saturação. Desse modo o MOSFET fica com uma R_{DS} pequena, da ordem de $m\Omega$, ou seja, caso seja ligado um módulo FV em paralelo com os terminais de *drain-source* (V_{DS}), o painel irá “enxergar” o MOSFET como um curto-circuito, entregando dessa maneira a sua máxima corrente (I_{SC}).

- Se o pino D8 for colocado em nível lógico alto e D7 em nível lógico baixo, o capacitor irá descarregar lentamente nos resistores R4 e R5 de $4,7\text{ K}\Omega$ e $100\text{ }\Omega$ respectivamente. Dessa maneira a tensão de *gate-source* (V_{GS}) do MOSFET varia lentamente até que o MOSFET entre na região de corte oferecendo uma resistência infinita para o módulo FV, assim o módulo enxerga o MOSFET como uma chave aberta entregando a sua tensão de circuito aberto (V_{OC}).
- Se o pino D7 estiver em nível lógico alto e o pino D8 em nível lógico baixo, o capacitor irá descarregar rapidamente sobre o resistor de $100\text{ }\Omega$.

4.2.1 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO

Agora que os circuitos a serem utilizados foram apresentados, resta uma etapa não menos importante que as demais, que é a calibração do sistema de aquisição, onde serão aplicadas tensão e corrente na placa de condicionamento de sinais da Figura 34, as saídas da placa serão conectadas a um Arduino *Uno* em suas portas analógicas A0 e A1, as quais são responsáveis pela leitura de tensão e corrente respectivamente.

Os ensaios foram realizados em bancada utilizando os seguintes equipamentos:

- Fonte de bancada alimentação simétrica *politerm model* pol-16;
- Multímetro Minipa ET- 2940 *True Rms*;
- Reostato Micateck RMFV 1 KW, 200 ohms;
- Placa de Condicionamento de Sinais;
- Notebook Samsung RV415;
- Arduino *Uno*.

A Figura 38 mostra o esquema de ligação para o ensaio de calibração da tensão lida na placa de condicionamento de sinais com a tensão real da fonte de bancada, lida por um multímetro *True Rms*.

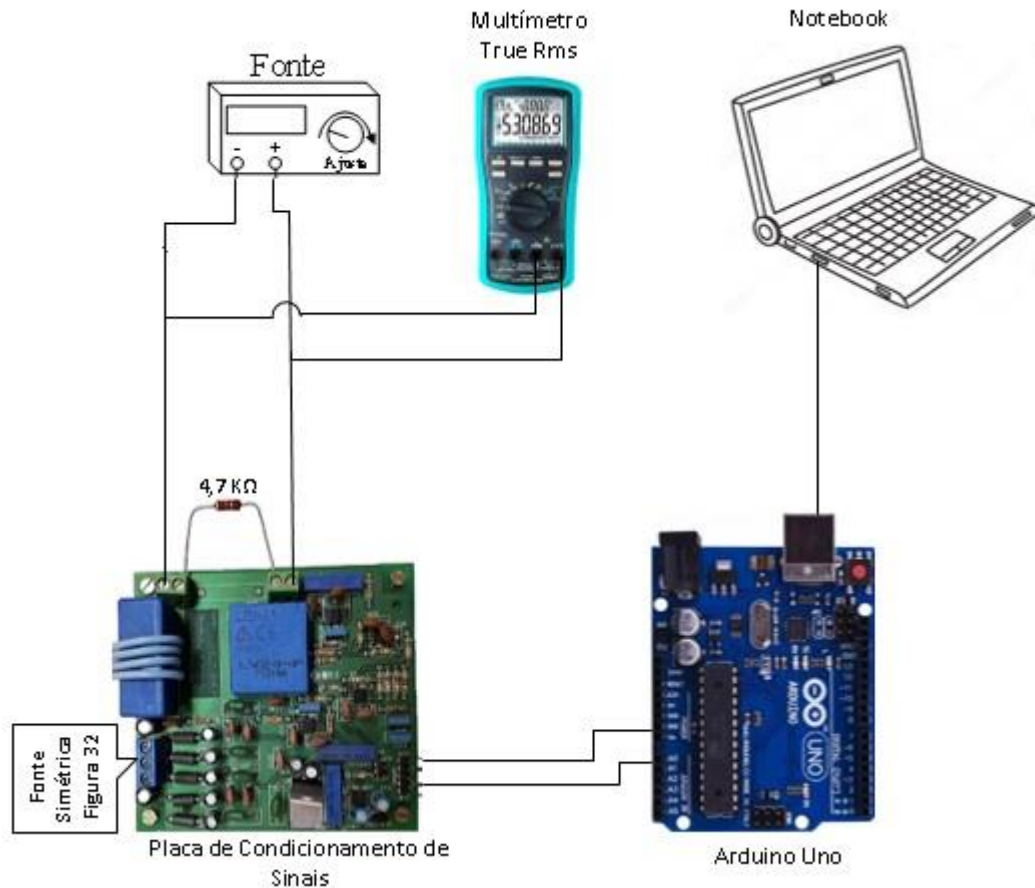


Figura 38 – Circuito de Calibração dos dados de tensão. Fonte [Autor].

Primeiramente a saída da fonte de bancada foi ligada e ajustada em 0 V para que fosse possível determinar o *offset* da tensão lida pela placa, que foi ajustado em 1,44 V com o auxílio do *trimpot* modelo 3006P 501, que pode ser visto na placa. Esse valor foi ajustado arbitrariamente e lido na porta analógica A0 do Arduino *Uno*, o qual possui uma conversão A/D de 10 bits, que lhe permite fazer leituras binárias de 0 a 1023_d (decimal), proporcionais a uma entrada de 0 a 5 V, assim o valor da tensão lida pela placa pode ser calculado da seguinte maneira.

$$Tensão_{PLACA} = Tensão_{bin} \times \frac{5}{1023} \quad (33)$$

Em que:

Tensão_{PLACA} Valor de tensão na saída da placa, proporcional a tensão de entrada;

Tensão_{BIN} Valor de tensão binário na entrada analógica do Arduino.

Com a equação (33) pode-se calcular a tensão na placa e utilizar o monitor serial para ler esses valores e anotá-los em uma tabela do Excel. O offset de 1,44 V é aproximadamente 295_d, que por sua vez é o valor lido na porta analógica (A0) do Arduino, logo se percebe que utilizando a equação (33) obtêm-se o valor da tensão de saída da placa de aquisição.

O próximo passo foi variar a tensão da fonte e observar o monitor serial para anotar os valores da tensão da placa e a tensão real lida no multímetro. A Tabela 2, abaixo, mostra os valores lidos de tensão na placa e tensão real.

Tabela 2 – Valores medidos de tensão na placa e seus respectivos valores reais medidos com o multímetro. Fonte [Autor].

Tensão Na Placa	Tensão Real	Tensão Na Placa	Tensão Real	Tensão Na Placa	Tensão Real	Tensão Na Placa	Tensão Real
1,44	0	1,64	13,07	1,85	26,83	2,1	43,132
1,45	0,738	1,65	13,69	1,86	27,522	2,12	44,57
1,46	1,311	1,66	14,29	1,87	28,063	2,14	45,78
1,47	1,947	1,67	14,94	1,88	28,674	2,16	47,09
1,48	2,5997	1,68	15,56	1,89	29,296	2,18	48,73
1,49	3,401	1,69	16,33	1,9	30,01	2,2	50,03
1,5	4,018	1,7	16,905	1,91	30,593	2,22	51,34
1,51	4,636	1,71	17,59	1,92	31,371	2,24	52,72
1,52	5,23	1,72	18,29	1,93	31,99	2,26	53,84
1,53	6,145	1,73	18,81	1,94	32,585	2,28	55,27
1,54	6,81	1,74	19,49	1,95	33,21	2,3	56,6
1,55	7,38	1,75	20,49	1,96	33,86	2,32	57,97
1,56	7,94	1,76	21	1,97	34,83	2,34	59,25
1,57	8,58	1,77	21,65	1,98	35,403	2,36	60,44
1,58	9,25	1,78	22,34	1,99	36,1	2,38	61,86
1,59	9,89	1,79	22,98	2	36,777	2,39	62,28
1,6	10,59	1,8	23,696	2,02	38,035	-	-
1,61	11,18	1,81	24,31	2,04	39,423	-	-
1,62	11,83	1,82	24,98	2,06	40,72	-	-
1,63	12,45	1,83	25,503	2,08	42,08	-	-

As medidas foram feitas considerando uma variação na tensão da placa de 0,01 V, porém devido a dificuldade de conseguir esse ajuste, à medida que a tensão da fonte aumentava, foi necessário utilizar uma variação de 0,02 V a partir dos 2 V lidos na placa. Pode-se observar na Tabela 2 que os valores de tensão na placa variam de 1,44 até 2,39 Volts e os valores de tensão reais medidos com o multímetro variam de 0 até 62,28 Volts.

Seguindo esse raciocínio foram utilizados os valores da Tabela 2 para criar um gráfico, em seguida foi utilizada a linha de tendência do Microsoft Excel para linearizar as medidas e fornecer uma equação. A Figura 39 abaixo mostra o gráfico utilizando a linha de tendência.



Figura 39 – Gráfico obtido com os dados da Tabela 2, utilizando a linha de tendência.
Fonte: [Autor].

Como pode ser observada na Figura 39 a linha de tendência fornecida pelo Excel, fornece também uma equação que relaciona o eixo de ordenadas (“y”) em função do eixo das abscissas (“x”), onde $y = \text{Tensão}_{\text{REAL}}$ e $x = \text{Tensão}_{\text{PLACA}}$, assim essa equação pode ser escrita conforme a equação (34) abaixo.

$$\text{Tensão}_{\text{REAL}} = \text{Tensão}_{\text{PLACA}} \times 65,671 - 94,599 \text{ [V]} \quad (34)$$

Dessa maneira pode-se usar a equação (34) para ler os valores reais de tensão com o auxílio do monitor serial, entretanto ao se utilizar essa equação verificou-se que para valores pequenos de tensão o erro na medição aumentava chegando uma variação de até $\pm 1 \text{ V}$. Para

diminuir esse erro o gráfico acima foi dividido em 07 gráficos com intervalos menores e utilizada a linha de tendência dessa forma o erro foi diminuído para até ± 640 mV em relação ao valor medido pelo multímetro *True Rms*. As divisões dos gráficos e suas respectivas equações ficaram da seguinte forma:

Para uma tensão na placa $\leq 1,44$ V, o valor de tensão real é igual a zero;

$$Tensão_{Real} = 0 \quad (35)$$

Para uma tensão na placa $> 1,44$ V e $< 1,52$ V, é utilizada a seguinte equação:

$$Tensão_{REAL} = Tensão_{PLACA} \times 66,398 - 95,606 \quad (36)$$

Para uma tensão na placa $\geq 1,52$ V e $< 1,61$ V, é utilizada a seguinte equação:

$$Tensão_{REAL} = Tensão_{PLACA} \times 64,592 - 92,784 \quad (37)$$

Para uma tensão na placa $\geq 1,61$ V e $< 1,76$ V, é utilizada a seguinte equação:

$$Tensão_{REAL} = Tensão_{PLACA} \times 65,046 - 93,617 \quad (38)$$

Para uma tensão na placa $\geq 1,76$ V e $< 1,91$ V, é utilizada a seguinte equação:

$$Tensão_{REAL} = Tensão_{PLACA} \times 63,808 - 91,232 \quad (39)$$

Para uma tensão na placa $\geq 1,91$ V e $< 2,07$ V, é utilizada a seguinte equação:

$$Tensão_{REAL} = Tensão_{PLACA} \times 67,717 - 98,732 \quad (40)$$

Para uma tensão na placa $\geq 2,07$ V e $< 2,21$ V, é utilizada a seguinte equação:

$$Tensão_{REAL} = Tensão_{PLACA} \times 67.082 - 97.64 \quad (41)$$

Para uma tensão na placa $\geq 2,21V$ e $< 2,4 V$, é utilizada a seguinte equação:

$$Tensão_{REAL} = Tensão_{PLACA} \times 65,077 - 93,107 \quad (42)$$

Essas equações foram utilizadas na programação do Arduino *Uno*, de forma que os valores ficaram próximos aos reais quando comparados com a medição do multímetro, validando as medições de tensão realizadas pela placa de condicionamento de sinais.

De maneira similar foi realizada a calibração dos valores lidos pelo sensor de corrente, com exceção da forma de ligação que inclui um reostato de 200 Ω /1 KW e um multímetro em série com a fonte para a medição da corrente. A Figura 40 mostra o esquema de ligação para o circuito de calibração da corrente.

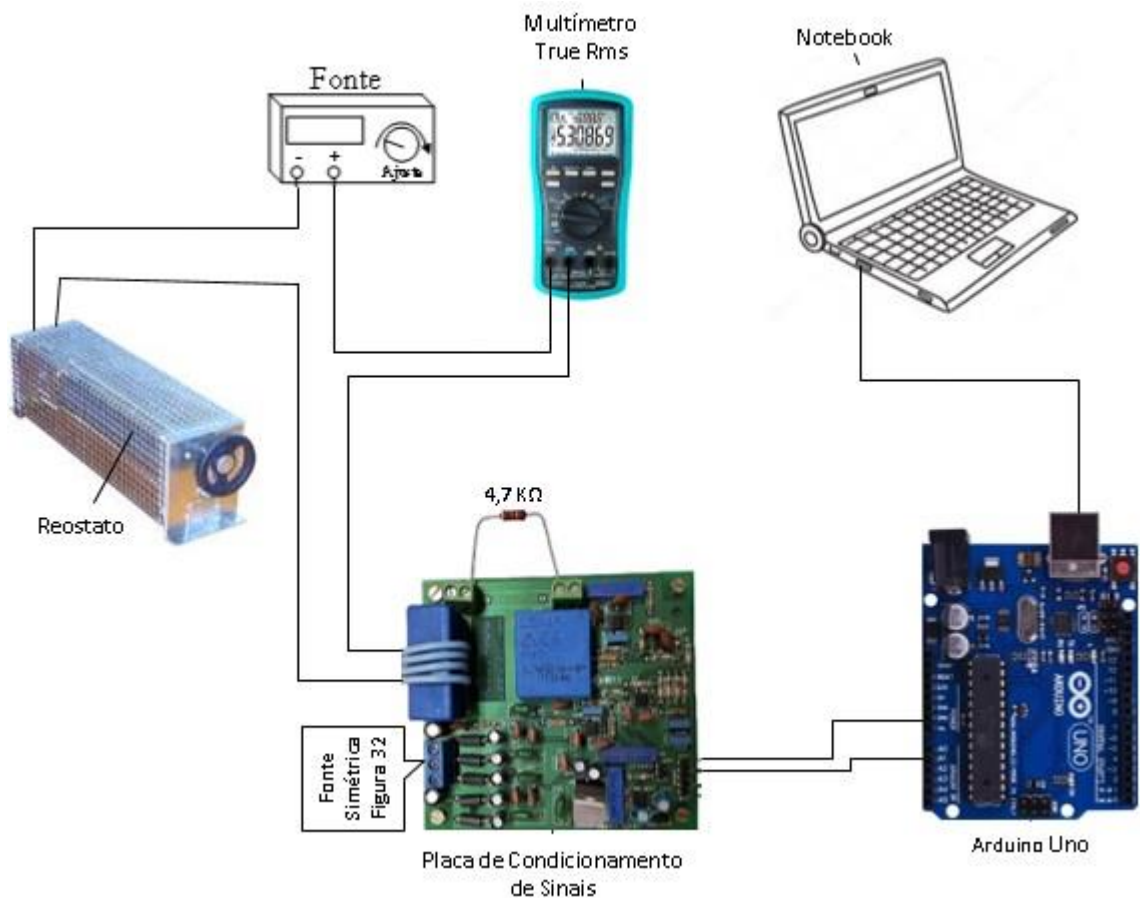


Figura 40 - Circuito de Calibração dos dados de corrente. Fonte: [Autor].

O procedimento para a calibração do circuito de corrente é similar ao de tensão. Vale relembrar que os valores referentes a corrente lidos na placa são tensões proporcionais a corrente de entrada, que recebe o nome de “Corrente_{PLACA}” nas equações. Essa nomenclatura foi utilizada apenas para facilitar a visualização de que se está calibrando a corrente que passa pelo sensor Hall LA 55 – P.

Dessa maneira o passo seguinte foi ajustar o reostato para uma resistência mínima variando entre 5 Ω e 10 Ω , para que, assim, a fonte varie a corrente entregue à medida em que aumenta-se a tensão dos terminais.

Seguindo o mesmo raciocínio da calibração de tensão, a fonte foi ajustada com tensão igual a 0 V, ou seja a corrente que passa pelo reostato é nula, dessa maneira pode-se ajustar o offset da saída de corrente em 1,48 V com o auxílio do um *trimpot* modelo 3006P 104 presente na placa, esse valor foi ajustado arbitrariamente e lido pela porta analógica A1 do Arduino *Uno*. De forma similar à equação (33) pode-se calcular o valor “Corrente_{PLACA}” utilizando a equação (42).

$$Corrente_{PLACA} = Corrente_{bin} \times \frac{5}{1023} \quad (43)$$

Onde,

Corrente_{PLACA} Valor de tensão na saída da placa, proporcional a corrente de entrada;

Corrente_{BIN} Valor de tensão binário na entrada analógica do Arduino.

Os próximos passos para a calibração de corrente são idênticos à calibração de tensão, com exceção dos valores adquiridos.

A Tabela 3 mostra os dados adquiridos com a variação da tensão na fonte de bancada.

Tabela 3 – Valores medidos de “corrente na placa” e seus respectivos valores de corrente real medidos com multímetro *True Rms*. Fonte [Autor].

“Corrente Na Placa”	Corrente Real	“Corrente Na Placa”	Corrente Real	“Corrente Na Placa”	Corrente Real
1,48	0	1,68	1,681	1,88	3,38
1,49	0,0488	1,69	1,753	1,89	3,462
1,5	0,121	1,7	1,83	1,9	3,552
1,51	0,2127	1,71	1,924	1,91	3,6412
1,52	0,3	1,72	2,003	1,92	3,723
1,53	0,4105	1,73	2,102	1,93	3,806
1,54	0,501	1,74	2,171	1,94	3,904
1,55	0,592	1,75	2,314	1,95	3,948
1,56	0,667	1,76	2,387	1,96	4,048
1,57	0,774	1,77	2,457	1,97	4,171
1,58	0,861	1,78	2,542	1,98	4,2
1,59	0,927	1,79	2,641	1,99	4,3
1,6	1,021	1,8	2,725	2	4,4
1,61	1,102	1,81	2,807	2,07	5
1,62	1,169	1,82	2,89	2,13	5,5
1,63	1,245	1,83	2,983	2,18	6
1,64	1,324	1,84	3,056	2,24	6,5
1,65	1,418	1,85	3,151	2,3	7
1,66	1,512	1,86	3,229	2,36	7,5
1,67	1,602	1,87	3,303	2,42	8

As medidas foram realizadas considerando uma variação na tensão da placa de 0,01 V, porém quando a tensão da placa chegou a 2 V, variou-se a corrente real medida pelo multímetro em aproximadamente 0,5 A até atingir o limite da fonte de bancada. Pode-se observar na Tabela 3 que os valores de tensão lidos na placa variam de 1,48 até 2,42 V enquanto que a corrente lida pelo multímetro variou de 0 até 8 A.

Dentro desse raciocínio foram utilizados os dados da Tabela 3 para aplicar o mesmo procedimento de calibração utilizado para a medição de tensão. A Figura 41 mostra o gráfico do Microsoft Excel com a linha de tendência.

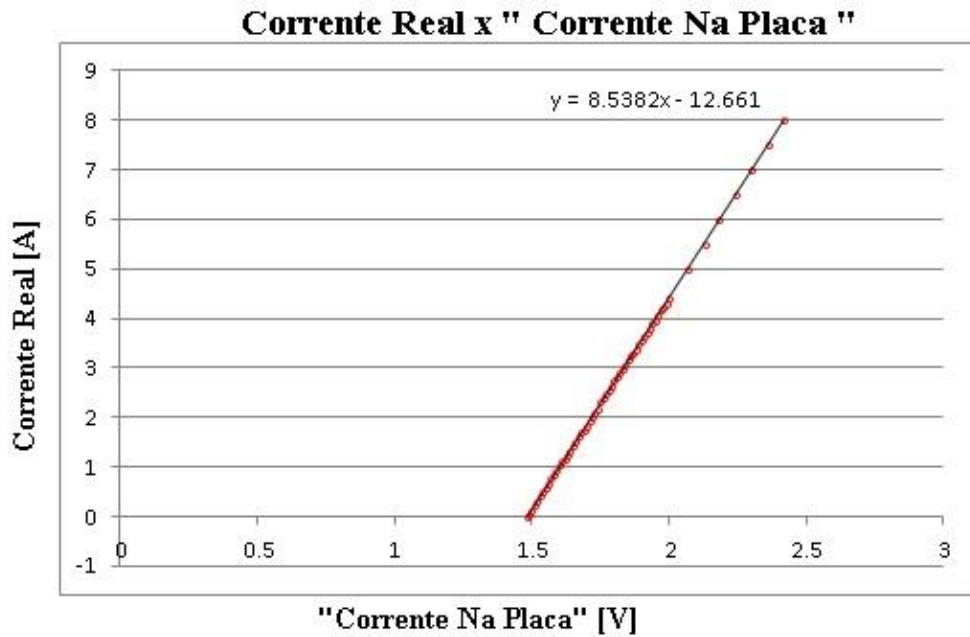


Figura 41- Gráfico obtido com os dados da Tabela 3, utilizando linha de tendência.
Fonte: [Autor].

A linha de tendência do gráfico acima fornece uma equação que foi utilizada da seguinte maneira:

$$Corrente_{REAL} = Corrente_{PLACA} \times 8,5382 - 12,661 \text{ [A]} \quad (44)$$

A equação (44) foi utilizada com o auxílio do monitor serial para fazer a leitura dos valores de corrente real, neste caso o erro máximo encontrado foi de ± 80 mA, justamente pelo fato do sensor ser enrolado com 4 voltas o que aumentou sua sensibilidade, dispensando o uso de vários intervalos de calibração como foram feitos para a sensor Hall de tensão.

De maneira similar, utilizou-se a equação (44) para calcular a corrente real e mostra-la no monitor serial enquanto a corrente da fonte de bancada era variada, assim foram comparadas as medidas lidas no monitor serial e no multímetro, validando a utilização da placa de condicionamento de sinais para a medição de corrente.

Depois de apresentados os circuitos e o funcionamento individual de cada um, o passo seguinte é a montagem e utilização em um módulo fotovoltaico para comparar a teoria vista até o momento com os ensaios práticos. A Figura 42 abaixo mostra o diagrama esquemático do caracterizador fotovoltaico montado.

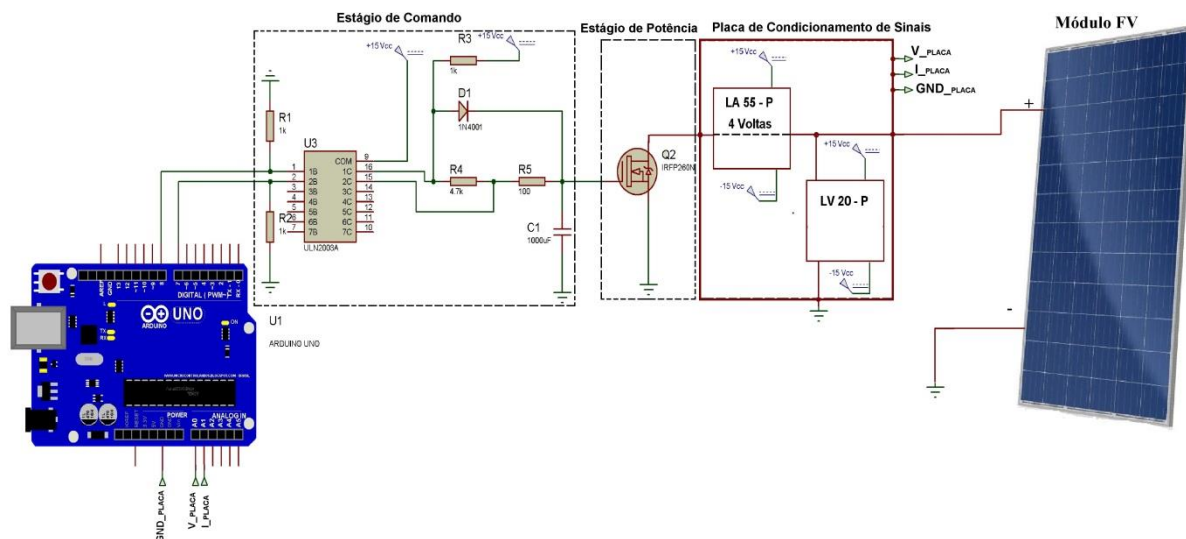


Figura 42 - Diagrama esquemático do Caracterizador com todos os estágios. Fonte [Autor].

4.3 ALGORITMO E INTERFACE GRÁFICA

O caracterizador funciona com um algoritmo, que é responsável pelo acionamento do circuito de comando descrito em 4.2 e também pela aquisição dos dados de tensão e corrente necessários para a caracterização do módulo FV.

Para escrever o algoritmo do controlador foi utilizada a IDE (*Integrated Development Environment*) de desenvolvimento para algoritmos da plataforma Arduino, que utiliza programação baseada em C/C++. Como já foi citado, o Arduino Uno foi o utilizado neste projeto e possui um *clock* de 16 MHz e um conversor A/D de 10 bits.

O primeiro passo para criar o algoritmo foi determinar a quantidade de pontos a serem lidos durante a descarga do capacitor de 1000 uF que compõe o circuito de comando da Figura 37.

Arbitrou-se 400 aquisições de tensão e corrente nos pinos A0 e A1, respectivamente. Porém, devido a variação binária na leitura das portas analógicas foi necessária a realização de uma média a cada 50 leituras, o que diminui o erro, porém aumentou a quantidade de leituras para 20.000, pois para cada aquisição precisa na porta analógica fez-se necessária realizar uma média de 50 leituras.

Seguindo esse raciocínio, o algoritmo foi implementado para realizar os cálculos de calibração de tensão e corrente, e também imprimindo os valores no monitor serial, porém era

necessário garantir que fossem impressas no monitor serial 400 pontos durante a descarga do capacitor, dessa maneira utilizou-se a função **micros ()** para calcular o tempo em que o loop era feito, sendo esse tempo de 5,1 s. A Figura 43 mostra o monitor serial com o cálculo do tempo de loop.

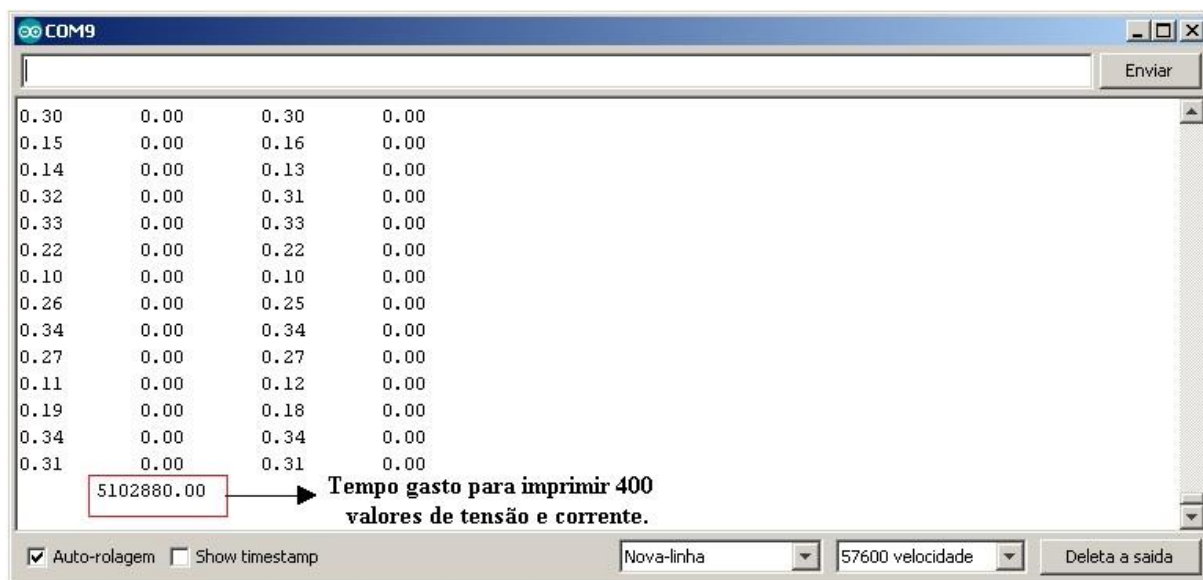


Figura 43 - Tempo em microssegundos gasto para imprimir 400 aquisições de tensão e corrente no monitor serial. Fonte [Autor].

A Figura 43 mostra os dados lidos pelo monitor serial. As colunas representam respectivamente tensão na placa, tensão real, “corrente na placa” e corrente real.

Desse modo foi necessário verificar o tempo de carga e descarga do capacitor, essa constante de tempo é chamada pela letra grega “ τ ” que é calculada da seguinte maneira [32]:

$$\tau = R.C \quad (45)$$

Em que:

- τ Constante de tempo de carga e descarga do circuito RC;
- R Resistência em paralelo com o capacitor;
- C Capacitância.

Utilizando a equação (45) pode-se calcular a constante de tempo para a descarga do capacitor no resistor de 4,7 K Ω que foi de 4,7 s. Observa-se que esse tempo é menor do que tempo de *loop* do programa.

Pode-se observar que o tempo de *loop* é suficiente para fazer as aquisições, visto que esse é maior que a constante de descarga do capacitor, porém para garantir uma descarga total do capacitor o tempo de loop foi estipulado em 10s ao considerar um “*delay*” de 248 microssegundos entre as leituras analógicas, pois como são feitas 20.000 leituras analógicas isso aumentaria em 4,96 s o tempo de loop, passando de 5,1 s para 10,06 s.

Em [32] o circuito RC é considerado em regime permanente ao decorrer de tempo de aproximadamente cinco 5τ , nesse caso foi utilizado um tempo de aproximadamente 2τ , visto que o MOSFET entrará em corte quando a tensão do capacitor for menor que 4 Volts.

Além do algoritmo desenvolvido na IDE do Arduino foi necessária a criação de uma interface gráfica para melhor utilização e funcionalidade do traçador, de forma que a utilização da plataforma seja intuitiva e rápida. Essa interface foi desenvolvida no software MATLAB, pois esse possui uma vasta biblioteca para a realização de cálculos e a criação de gráficos necessários neste projeto e, também, por possuir a disponibilidade de comunicação USB com o Arduino, o que facilita a extração dos dados. A Figura 44 mostra a interface gráfica criada com a ferramenta GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*) do MATLAB.



Figura 44 - Interface Gráfica Criada no MATLAB. Fonte [Autor].

A utilização da interface gráfica tem como finalidade permitir que o usuário interaja com a programação, através de botões e caixas de texto. Observando a Figura 44 pode-se perceber que o usuário tem opções de botões como: Iniciar, Extrair dados, Limpar dados e Caracterizações Salvas, que por sua vez são bem intuitivos.

Essa interface gráfica interage diretamente com o Arduino, através da comunicação USB, ou seja, o usuário comanda o algoritmo que está gravado no controlador.

A utilização dessa interface deve seguir os seguintes passos:

- Primeiro o usuário deverá conectar o Arduino Uno ao computador, com o algoritmo já gravado e identificar a porta COM a qual o mesmo está conectado.
- O segundo passo é selecionar a porta COM em “Selecione a Porta de Comunicação”.
- Em terceiro, verificar as conexões e ligar a fonte simétrica.
- Por último, clicar no botão “Iniciar” e aguardar a plotagem dos gráficos. Após a plotagem dos gráficos o usuário poderá extrair os dados clicando no botão “Extrair Dados”, caso seja necessário.
- A interface possui também um botão “Caracterizações Salvas”, que é independente dos passos citados acima, podendo ser utilizada apenas para a visualização de dados salvos pelo usuário.

O fluxograma da Figura 45 mostra como funciona o algoritmo gravado no Arduino, comandado pela inicialização da comunicação USB do MATLAB.

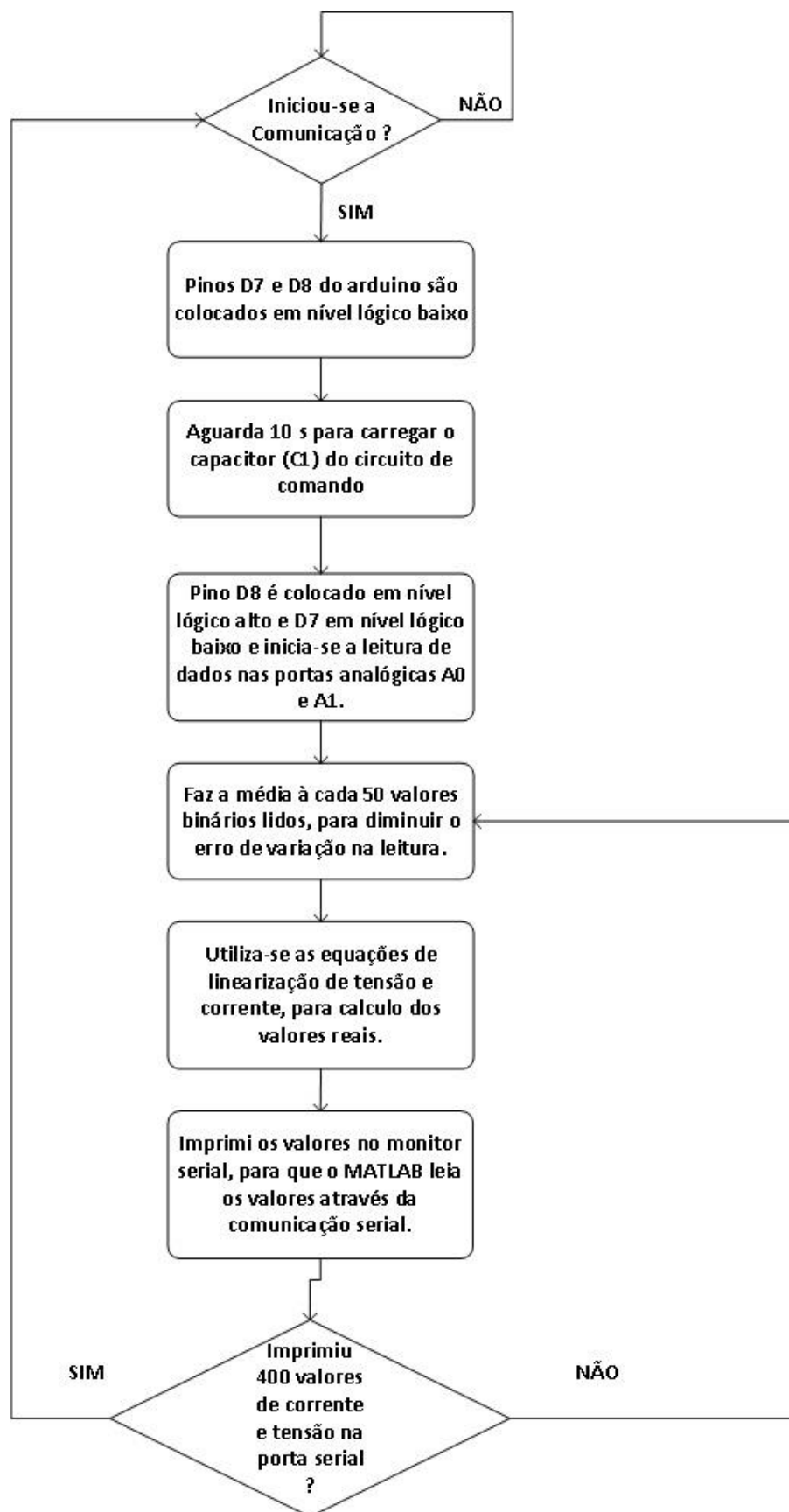


Figura 45 – Fluxograma do algoritmo utilizado, para a caracterização de um painel fotovoltaico.
Fonte: [Autor].

O fluxograma da Figura 45 demonstra o funcionamento do Arduino em conjunto com a interface gráfica, pois esse aguarda uma comunicação serial com o MATLAB para a realização da aquisição de dados. Assim que essa aquisição de dados é realizada, o Arduino fica aguardando outra comunicação, enquanto os gráficos são plotados na tela da interface gráfica e os dados principais da caracterização são impressos nas caixas de texto definidas.

Os códigos utilizados para realizar a aquisição de dados do Arduino e a comunicação MATLAB/Arduino estão no Apêndice B desse projeto, sendo o Arduino responsável por comandar o circuito e realizar a aquisição de dados, enquanto que o MATLAB faz a comunicação serial, cálculos de tensão e corrente de máxima potência e plotagem dos gráficos.

CAPÍTULO 5

ENSAIOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ENSAIO COM FONTE DE BANCADA SIMULANDO UM PAINEL.

Agora que todas as etapas da caracterização de painéis fotovoltaicos foram discutidas, a próxima etapa é a realização de ensaios com o caracterizador construído, com o intuito de validar o projeto com as aplicações práticas. O primeiro ensaio realizado foi utilizando a fonte de bancada para simular um painel fotovoltaico, como a fonte possui um controle interno de tensão, utilizou-se um reostato ajustado com $0,5\ \Omega$ em serie com o *drain-source* do MOSFET, de maneira que a fonte entregue sua corrente máxima, sem que seus terminais sejam curto-circuitados quando o MOSFET estiver na região de saturação. A Figura 46 mostra o ensaio utilizando uma fonte de bancada.



**Figura 46 - Ensaio com a Fonte de Bancada Simulando um painel fotovoltaico.
Fonte [Autor].**

Como pode-se observar, a Figura 46 mostra o esquema utilizado para o ensaio, com os equipamentos da esquerda para a direita na seguinte sequência: Notebook com a interface gráfica, Caracterizador Fotovoltaico (Caixa preta), Fonte de bancada e o Reostato, que estão ligados de maneira similar à Figura 42, com exceção do Reostato. A Figura 47 abaixo mostra a parte interna da caixa, com os circuitos do caracterizador.

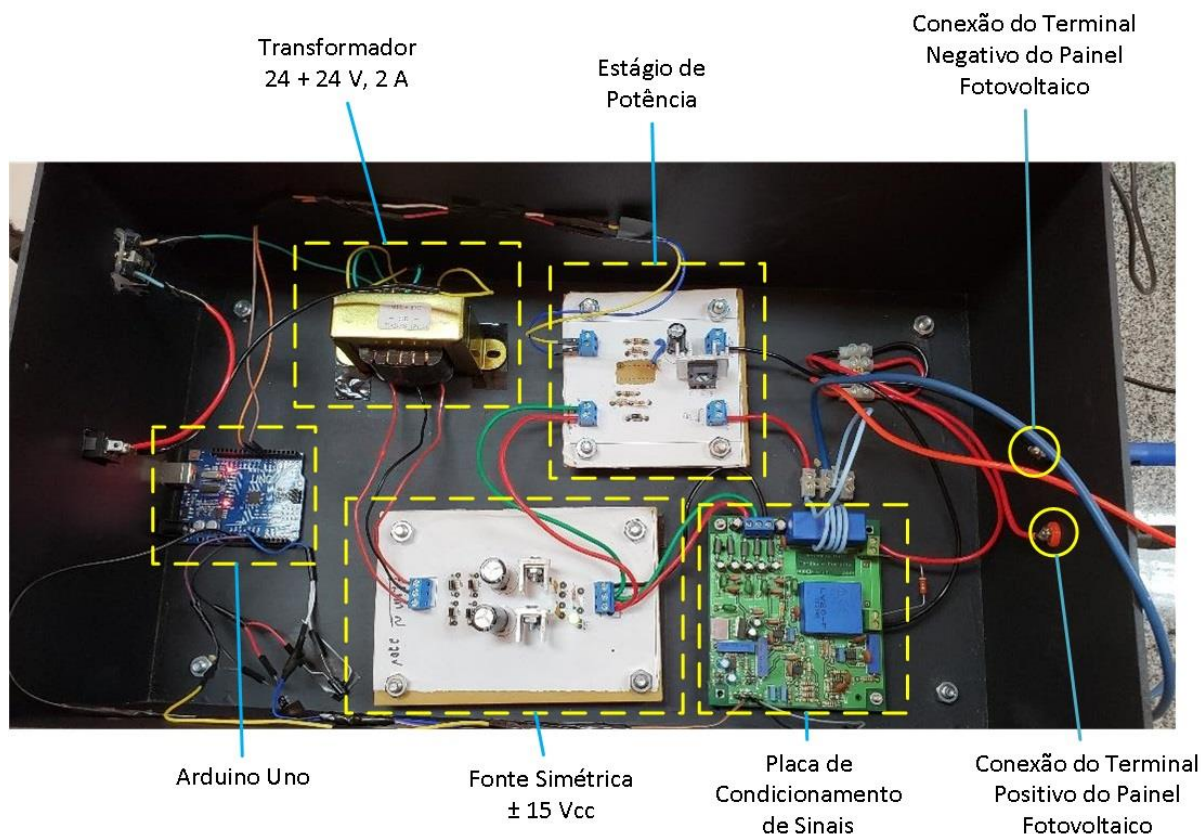


Figura 47 – Caracterizador Fotovoltaico. Fonte [Autor].

Os ensaios foram realizados ajustando a fonte de bancada de forma independente, limitando a fonte a uma tensão e corrente de aproximadamente 30 V e 3 A respectivamente.

A caracterização foi obtida com incrementos de 5 V até alcançar a tensão máxima da fonte em sua ligação independente. As Figuras de 48 a 53 mostram os resultados obtidos com os ensaios.

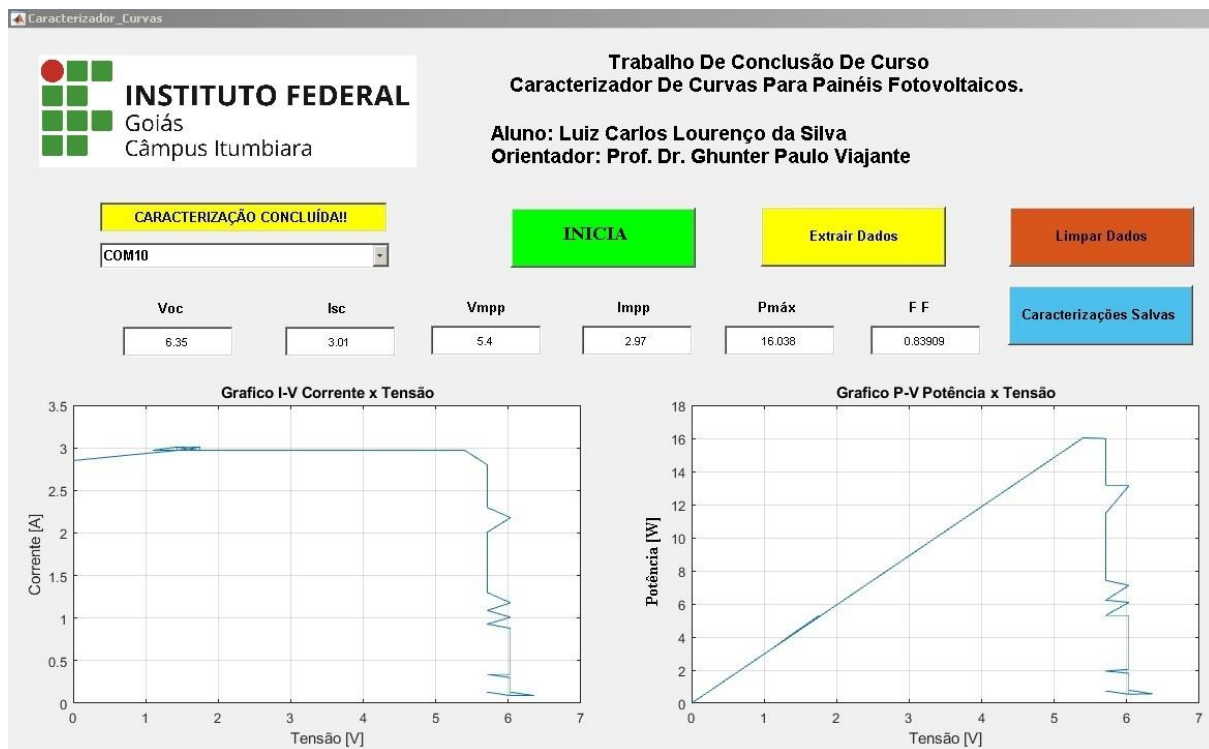


Figura 48 – Ensaio com a fonte de bancada ajustada em 5 Vcc. Fonte [Autor].

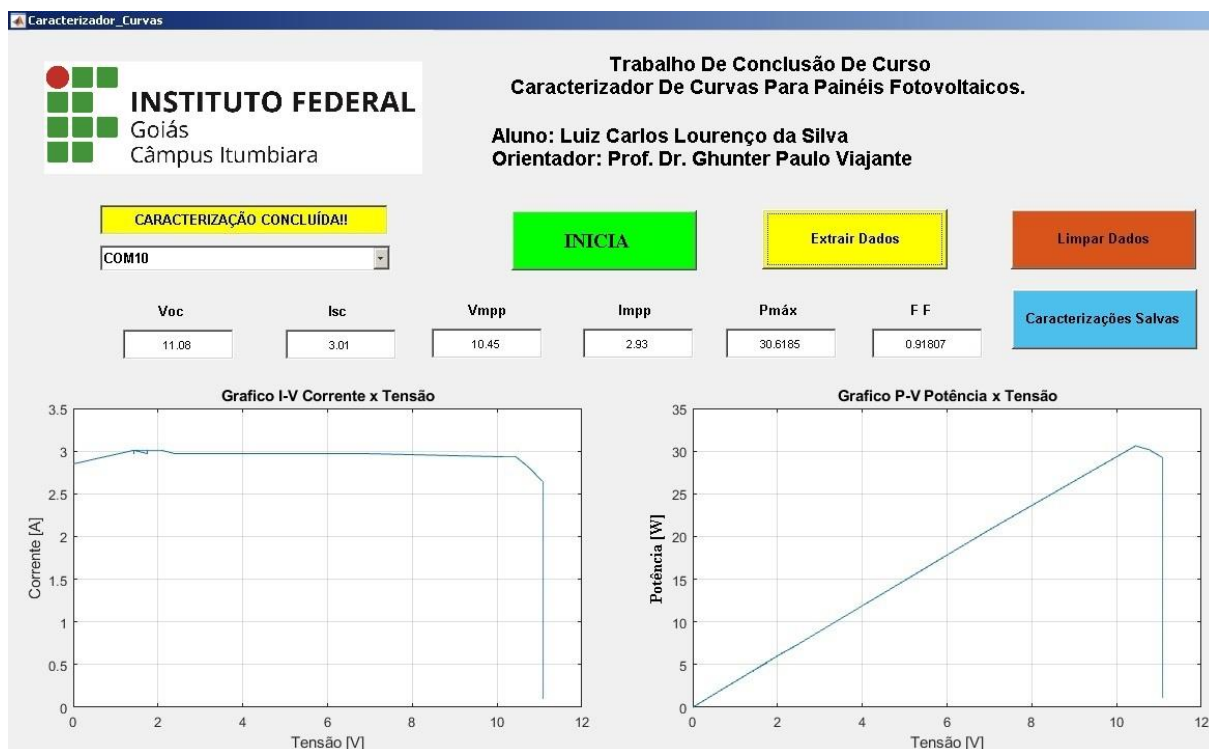


Figura 49 - Ensaio com a fonte de bancada ajustada em 10 Vcc. Fonte [Autor].



Figura 50 - Ensaio com a fonte de bancada ajustada em 15 Vcc. Fonte [Autor].



Figura 51 - Ensaio com a fonte de bancada ajustada em 20 Vcc. Fonte [Autor].



Figura 52 - Ensaio com a fonte de bancada ajustada em 25 Vcc. Fonte [Autor].



Figura 53 - Ensaio com a fonte de bancada ajustada em 30 Vcc. Fonte [Autor].

Os principais dados obtidos nos ensaios podem ser vistos de maneira resumida na Tabela 4, o que possibilita uma rápida avaliação dos resultados obtidos.

Tabela 4 - Ensaios Realizados com a Fonte de bancada. Fonte [Autor]

Ensaios com a fonte de bancada simulando um módulo FV.						
Ajuste da Fonte	Voc	Isc	Vmpp	Impp	Pmáx	F.F
5 V	6,35	3,01	5,4	2,97	16,038	0,83909
10 V	11,08	3,01	10,45	2,93	30,6185	0,91807
15 V	16,06	3,01	15,43	2,93	45,2099	0,93524
20 V	21,35	3,01	20,52	2,93	60,1236	0,93558
25 V	26,34	3,01	26,03	2,89	75,2267	0,94883
30 V	31,34	3,01	31,01	2,93	90,8593	0,96317

Frente ao exposto observa-se nos gráficos das Figuras 48 a 53, que o comportamento da fonte de bancada é bastante similar ao comportamento do painel fotovoltaico visto em teoria, portanto esses ensaios mostram que o caracterizador utilizando o MOSFET como carga eletrônica está operando de acordo com o previsto, validando o projeto para ensaios com um painel fotovoltaico.

5.2 ENSAIOS COM O PAINEL FV

Para os ensaios práticos utilizou-se o mesmo módulo FV utilizado nas simulações do Capítulo 3, cujas informações principais estão na Tabela 1.

Os ensaios foram realizados no Instituto Federal de Goiás – Campus Itumbiara, conforme a Figura 54.



Figura 54 - Ensaio com módulo FV orientado para o norte. Fonte [Autor].

Foram obtidas diversas curvas para o módulo FV utilizado, sendo os principais resultados mostrados nas Figuras 55 a 61.

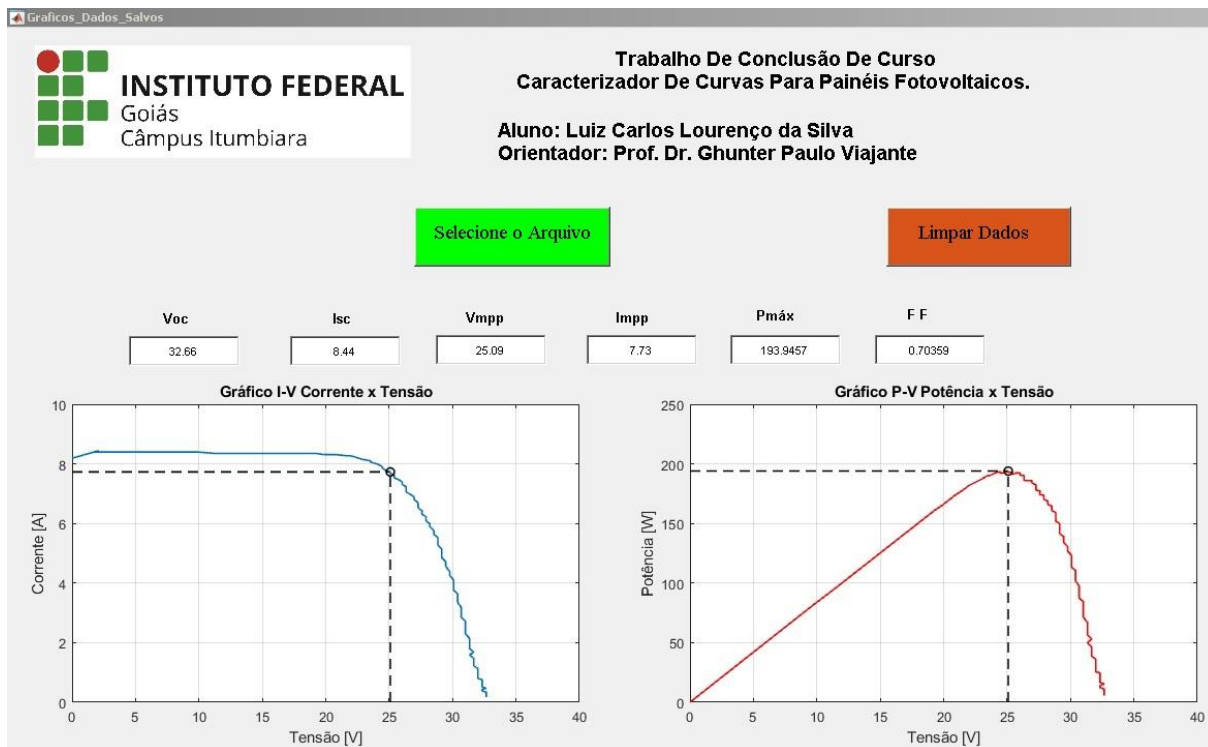


Figura 55 - Resultado experimental com módulo direcionado para o norte e ângulo de 0° realizado às 13h09mi do dia 12/04/2019. Fonte [Autor].

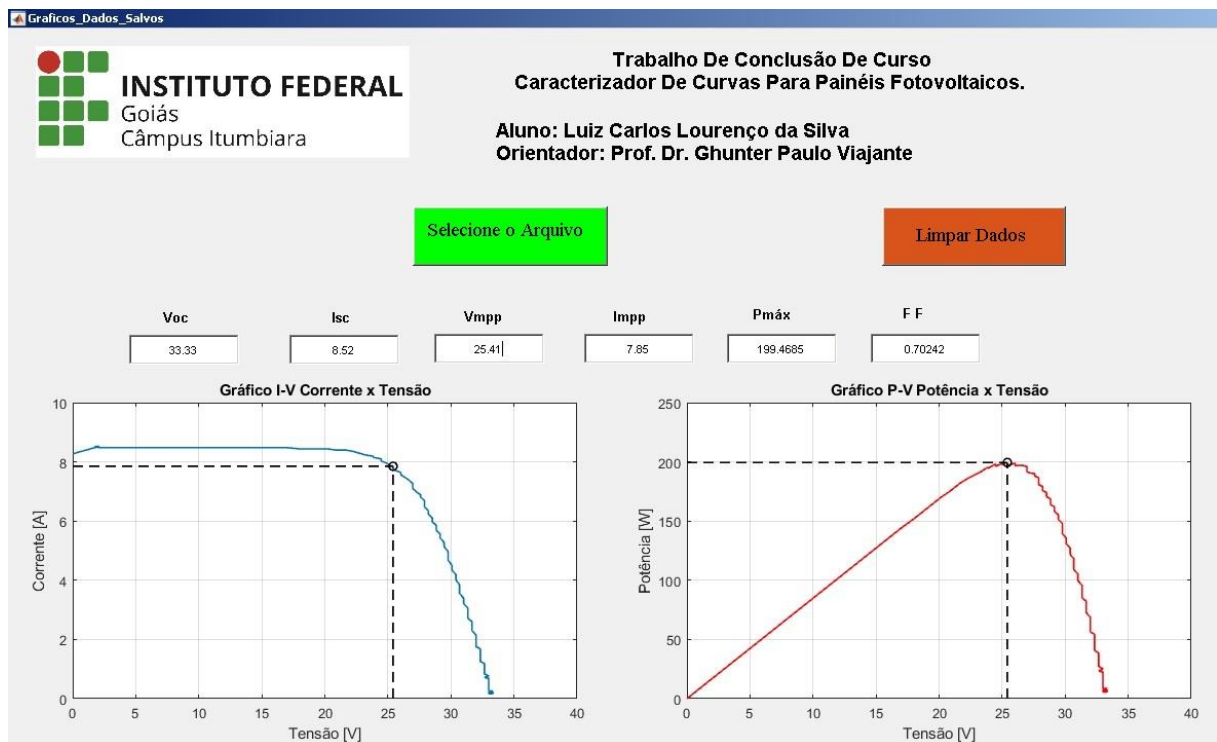


Figura 56 - Resultado experimental com módulo direcionado para o norte e ângulo de 5° realizado às 13h03min do dia 12/04/2019. Fonte [Autor].

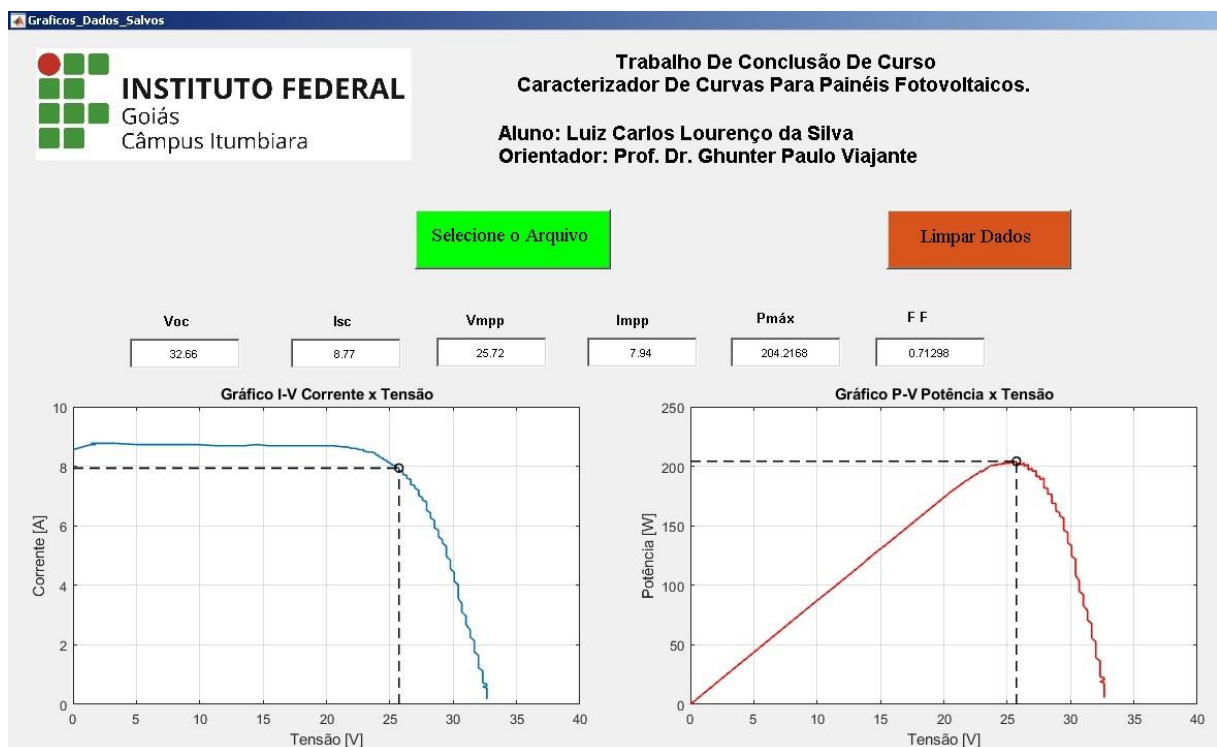


Figura 57 - Resultado experimental com módulo direcionado para o norte e ângulo de 10° realizado às 13h14min do dia 12/04/2019. Fonte [Autor].

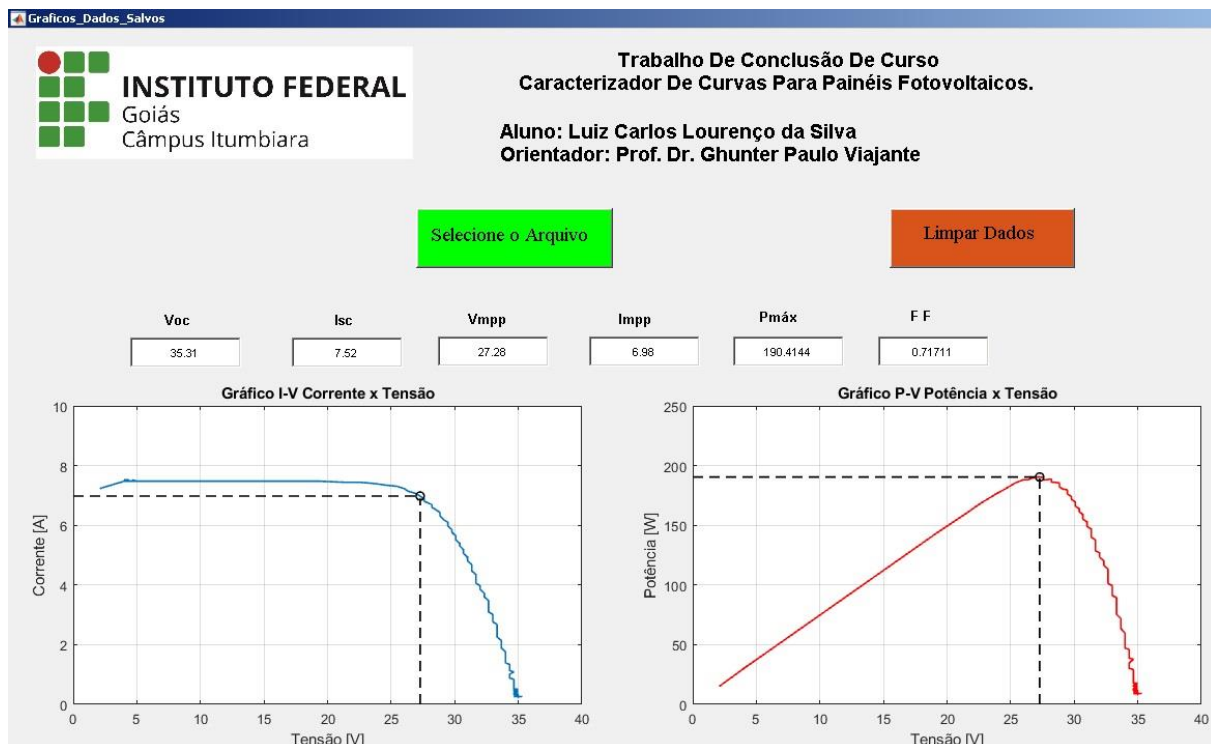


Figura 58 - Resultado experimental com módulo direcionado para o norte e ângulo de 0° realizado às 14h00min do dia 17/04/2019. Fonte [Autor].

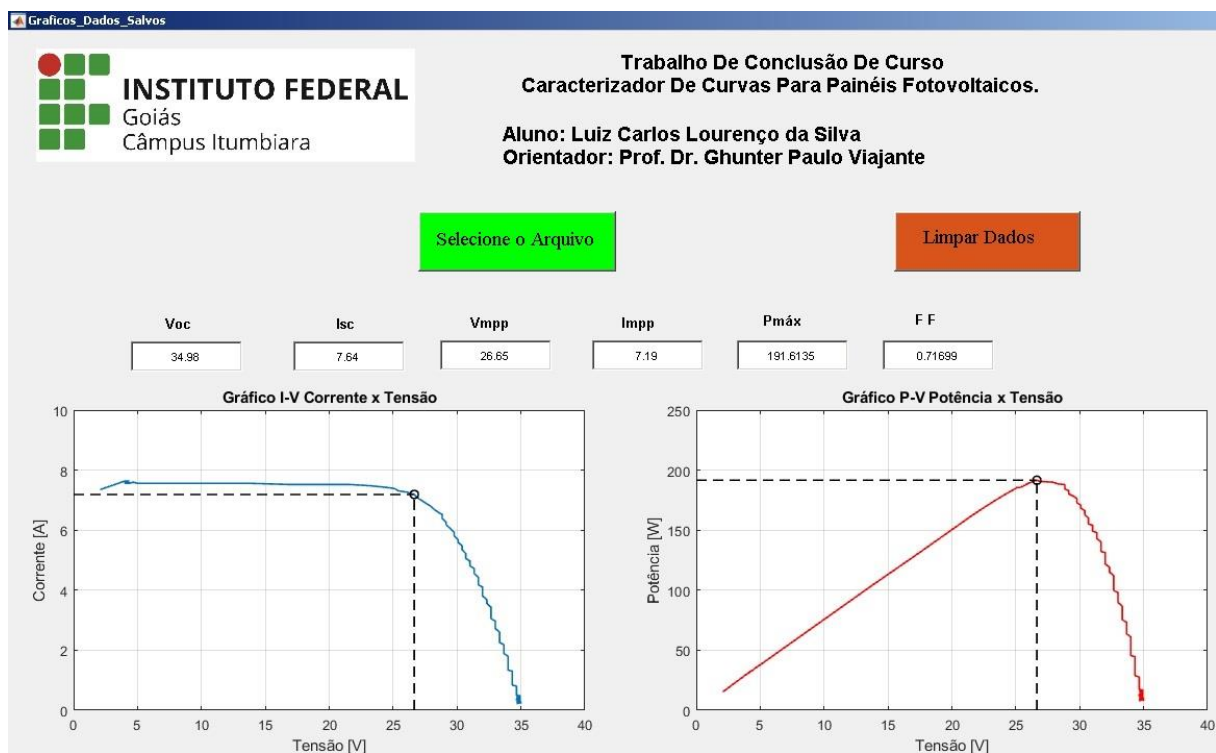


Figura 59 - Resultado experimental com módulo direcionado para o norte e ângulo de 5° realizado às 14h13min do dia 17/04/2019. Fonte [Autor].

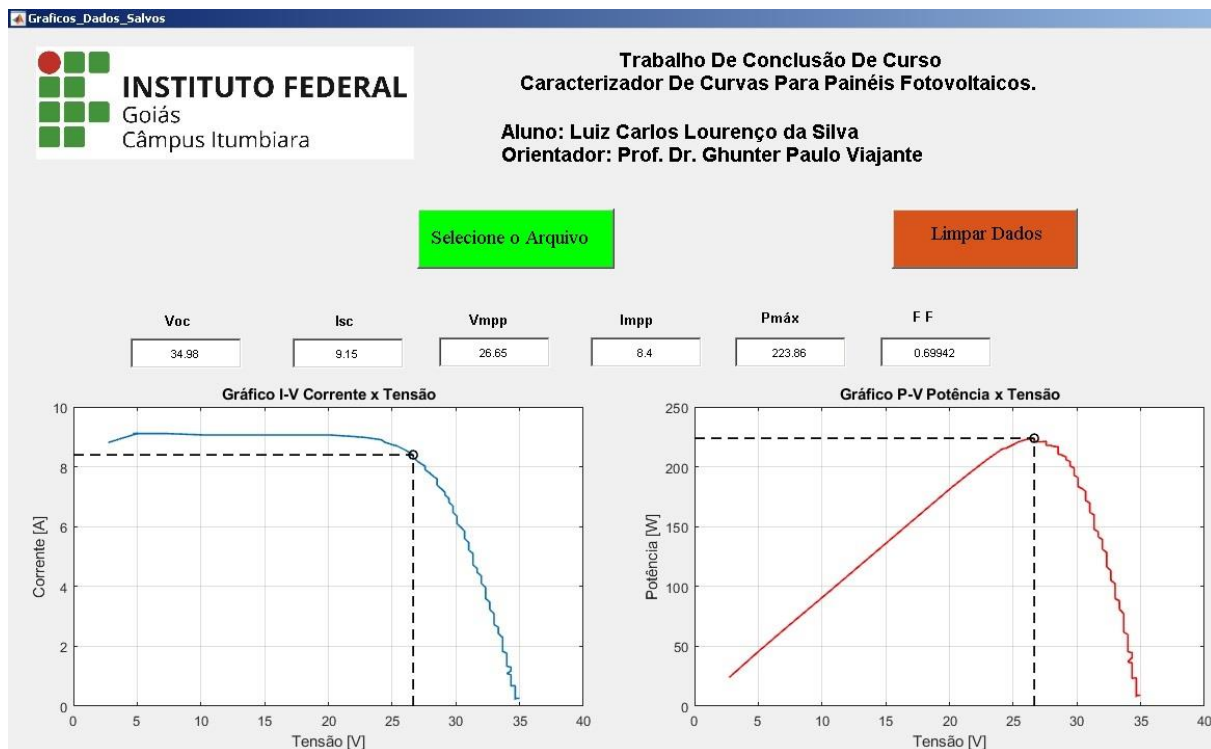


Figura 60 - Resultado experimental com módulo direcionado para o norte e ângulo de 18° realizado as 14h08min do dia 17/04/2019. Fonte [Autor].

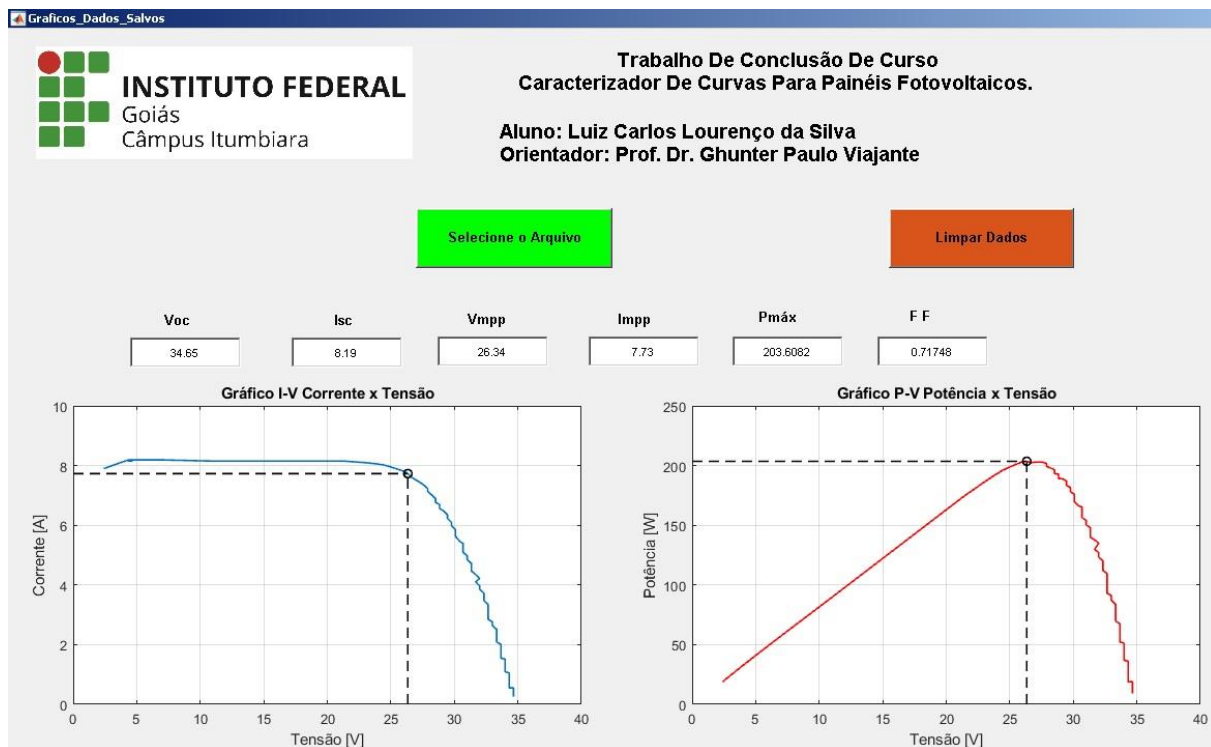


Figura 61 - Resultado experimental com módulo direcionado para o norte e ângulo de 25° realizado às 14h20min do dia 17/04/2019. Fonte [Autor].

Como pode-se observar nas Figuras 55 a 61, as curvas características do painel se comportaram de acordo com a teoria, o que valida o método utilizado. Os gráficos das Figuras 55 a 57 utilizaram o MOSFET IRFP260N como carga eletrônica, já os gráficos das Figuras 58 a 61 utilizaram o MOSFET IRFP460N, essa mudança foi necessária após o primeiro componente ser danificado pela dissipação de potência, sendo necessário aumentar o tamanho do dissipador e adicionar um *cooler* para refrigerar o componente.

O transistor de potência IRFP260N foi substituído pelo fato de não haver um sobressalente deste componente disponível, então um MOSFET similar foi utilizado, nesse caso, o IRFP460N, que suporta uma tensão V_{DS} de 500 V, uma corrente I_{DS} de 20 A, potência de 280 W e possui uma resistência R_{DS} de 240 mΩ [33].

A característica que é mais relevante na troca destes componentes é o R_{DS} que aumentou 5 vezes em relação ao do IRFP260N, o que interfere na curva característica I-V, onde pode-se observar que os gráficos não tocam o eixo das ordenadas.

5.3 COMPARATIVO ENTRE SIMULAÇÃO E PRÁTICA

Neste item é exposta a comparação entre as curvas obtidas por simulação computacional e as curvas obtidas na prática. A temperatura do painel foi medida usando uma câmera termográfica, já os dados de irradiação foram adquiridos pela estação meteorológica do Instituto Federal de Goiás – Campus Itumbiara.

Os dados são adquiridos pela estação meteorológica a cada 5 minutos, logo, devido a característica dinâmica da irradiância, foi necessário estimar a irradiação fora deste intervalo reorganizando a equação (21), onde a corrente $I_{ph} \cong I_{SC}$ e o termo $(1 + \alpha \cdot \Delta T) \cong 1$, logo a equação pode ser utilizada conforme (46), onde a corrente I_{SC} é o valor obtido no ensaio prático.

$$E_{estimado} = \frac{I_{SC} \times E_{STC}}{I_{SCS}} \quad (46)$$

Os gráficos das Figuras 62 e 63 mostram o comportamento da irradiação com base nos dados adquiridos pela estação meteorológica nos dias 12/04/2019 e 17/04/2019 no período de 11h00min as 15h00min, que compreendem o intervalo em que os ensaios foram realizados.

As Figuras 62 e 63 ilustram o comportamento da irradiação incluindo os valores estimados no horário da caracterização do módulo FV, assim pode-se observar o comportamento esperado da irradiação.

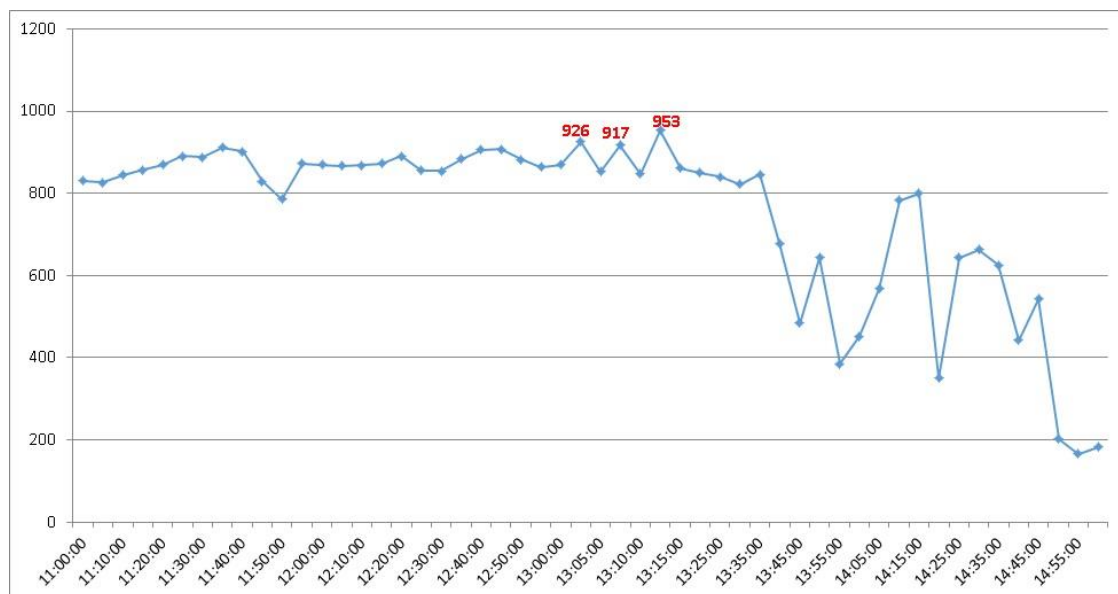


Figura 62 – Gráfico incluindo a irradiação estimada (em vermelho) e os dados da estação meteorológica no dia 12/04/2019 entre os horários de 11h00min e 15h00min. Fonte [Autor].

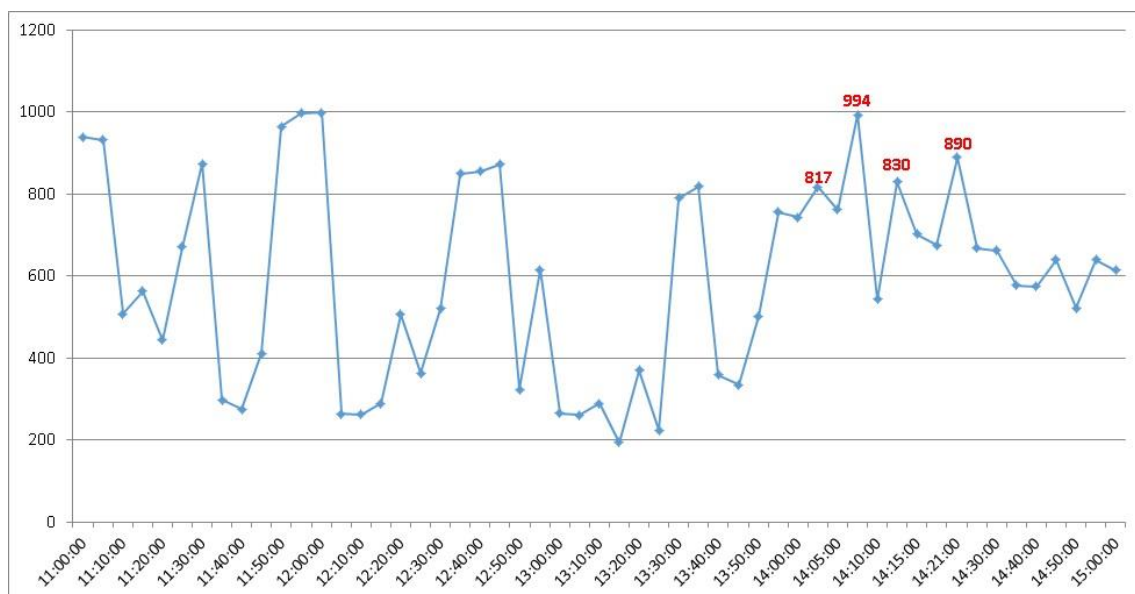


Figura 63 - Gráfico incluindo a irradiação estimada (em vermelho) e os dados da estação meteorológica no dia 17/04/2019 entre os horários de 11h00min e 15h00min. Fonte [Autor].

Em relação aos dados de temperatura, como os ensaios foram realizados durante um curto período de tempo, considerou-se a maior temperatura medida no módulo. As Figuras 64 e 65 mostram a temperatura medida pela câmera termográfica.

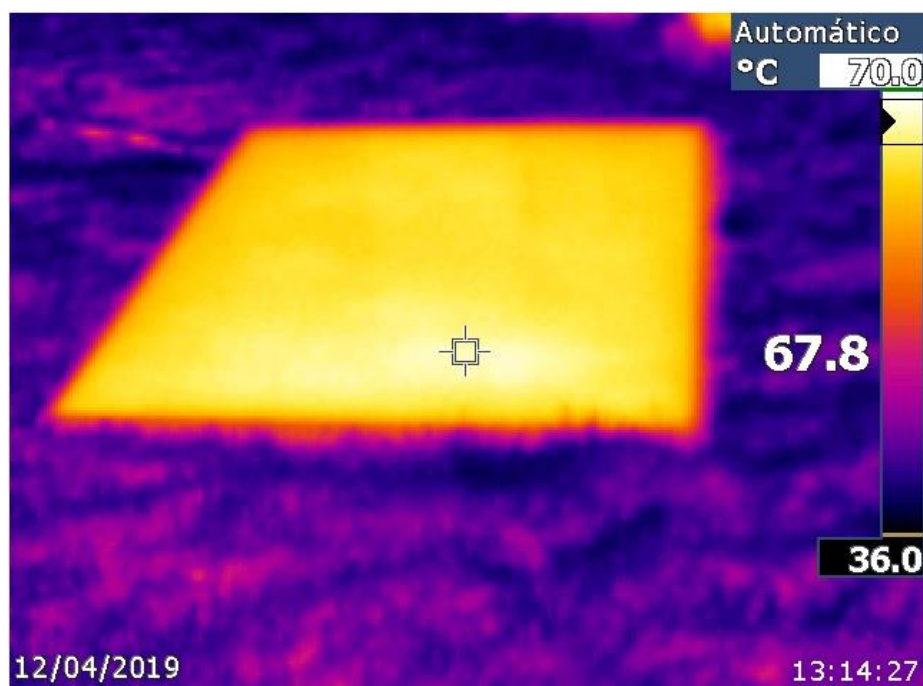


Figura 64 – Temperatura medida pela câmera termográfica durante o ensaio do dia 12/04/2019.
Fonte [Autor]

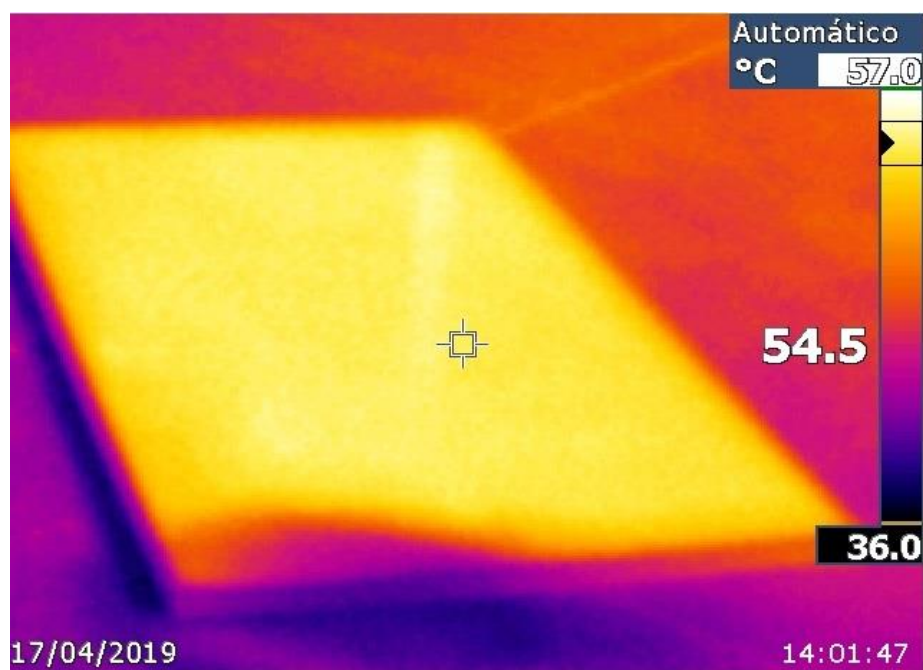


Figura 65 – Temperatura medida pela câmera termográfica durante o ensaio do dia 17/04/2019.
Fonte [Autor].

Com base nos dados de irradiação e temperatura obtidos, realizou-se a comparação entre as curvas obtidas na prática com a simulação computacional do Apêndice A. Os gráficos das Figuras 66 a 72 mostram a comparação para cada situação em que os ensaios foram realizados.

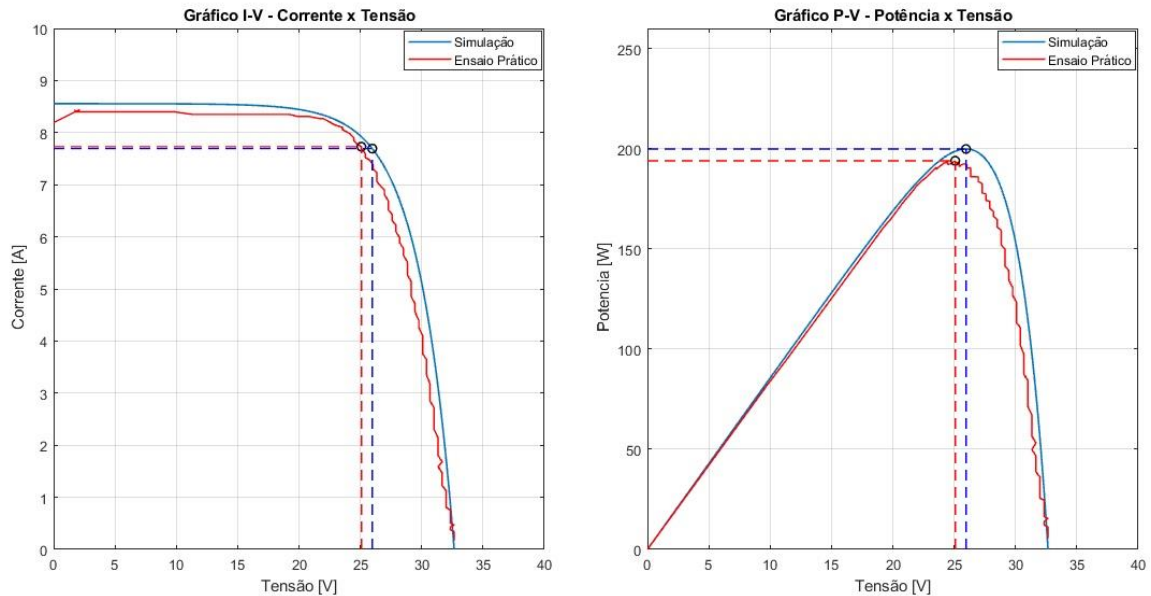


Figura 66 - Comparação curva obtida na prática (em vermelho) com a curva obtida na simulação (em azul), painel com orientação para o norte a 0° em 12/04/2019 às 13h09min, temperatura de 67,8° C e irradiação estimada de 917 W/m². Fonte [Autor].

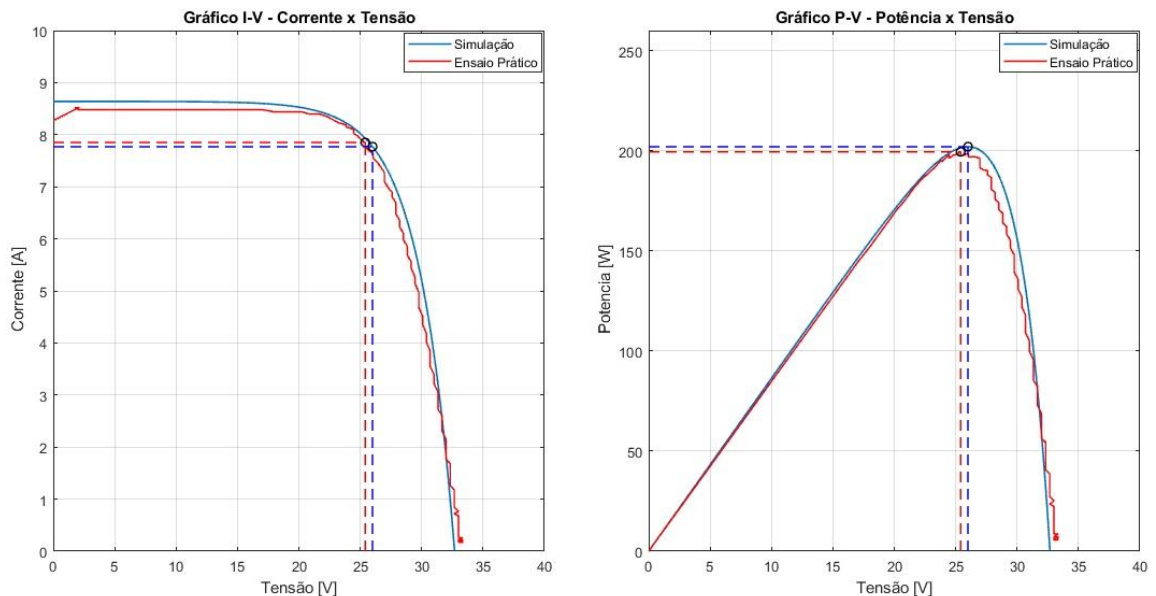


Figura 67 - Comparação curva obtida na prática (em vermelho) com a curva obtida na simulação (em azul), painel com orientação para o norte a 5° em 12/04/2019 às 13h03min, temperatura de 67,8° C e irradiação estimada de 926 W/m². Fonte [Autor].

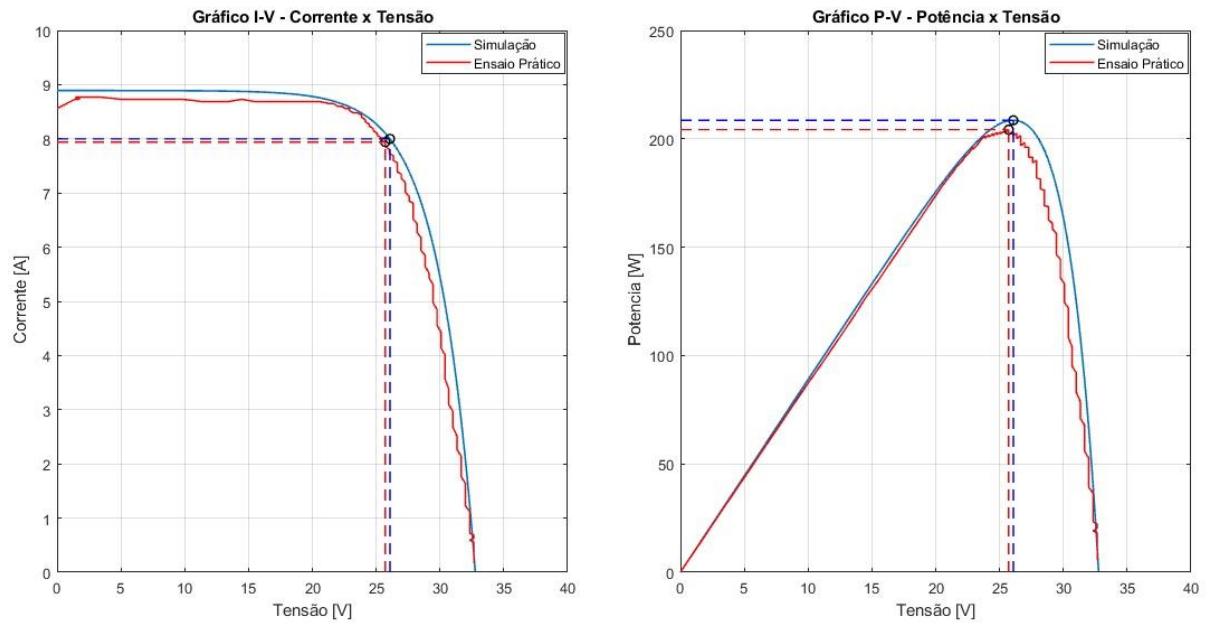


Figura 68 - Comparação curva obtida na prática (em vermelho) com a curva obtida na simulação (em azul), painel com orientação para o norte a 10° no dia 12/04/2019 às 13h14min, temperatura de 67,8 °C e irradiação estimada de 953 W/m². Fonte [Autor].

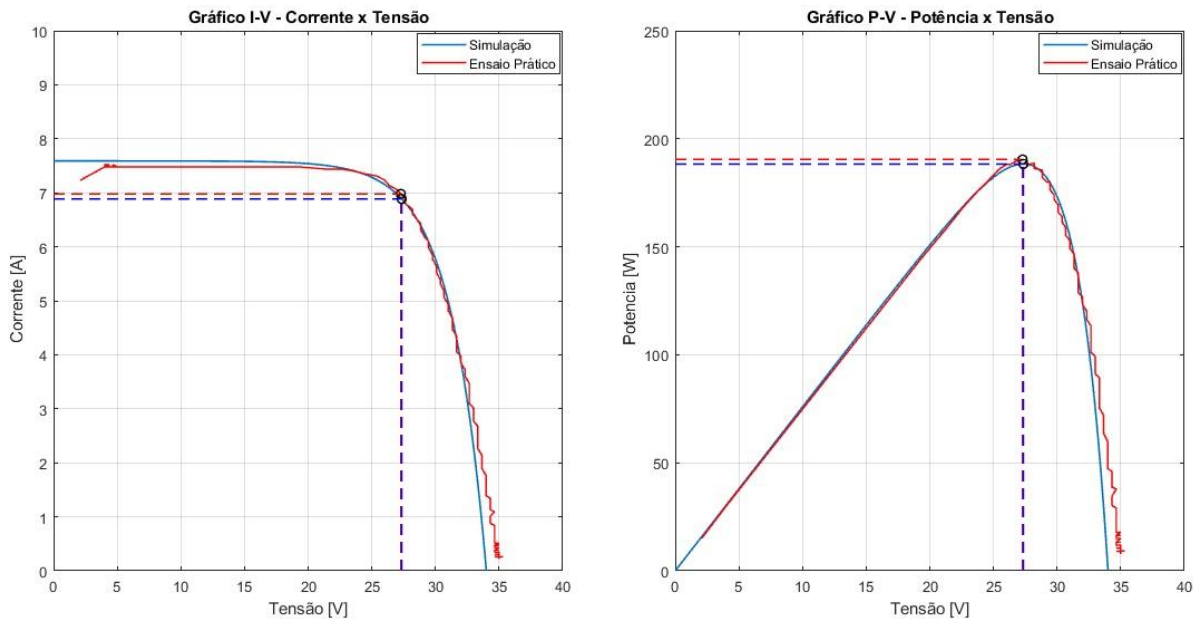


Figura 69 - Comparação curva obtida na prática (em vermelho) com a curva obtida na simulação (em azul), painel com orientação para o norte a 0°, em 17/04/2019 às 14h01min, temperatura de 54,5° C e irradiação estimada de 817 W/m². Fonte [Autor].

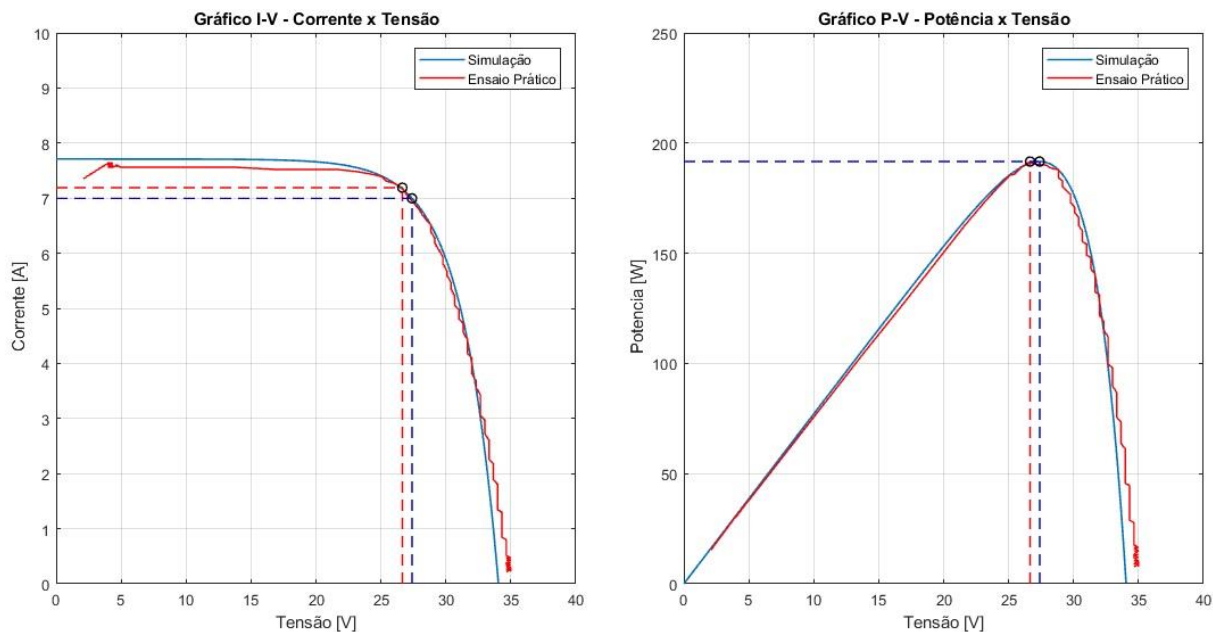


Figura 70 - Comparação curva obtida na prática (em vermelho) com a curva obtida na simulação (em azul), painel com orientação para o norte a 5°, em 17/04/2019 14h13min, temperatura de 54,5° C e irradiação estimada de 830 W/m². Fonte [Autor].

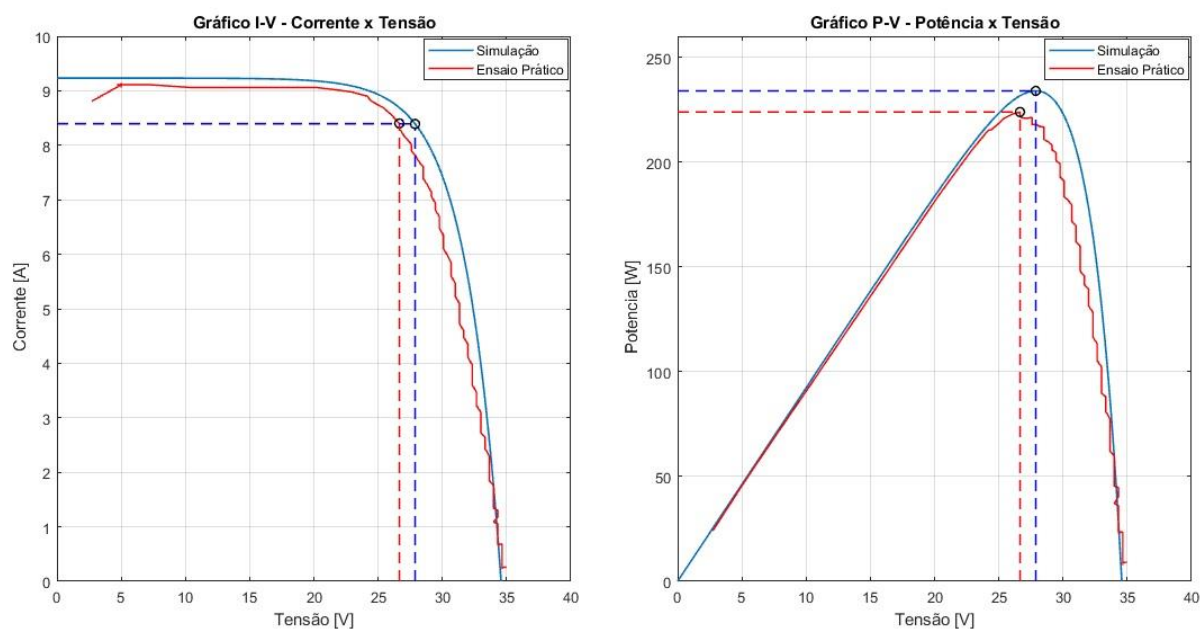


Figura 71 - Comparação curva obtida na prática (em vermelho) com a curva obtida na simulação (em azul), painel com orientação para o norte a 18°, em 17/04/2019 às 14h08min e temperatura de 54,5° C e irradiação estimada de 994 W/m². Fonte [Autor].

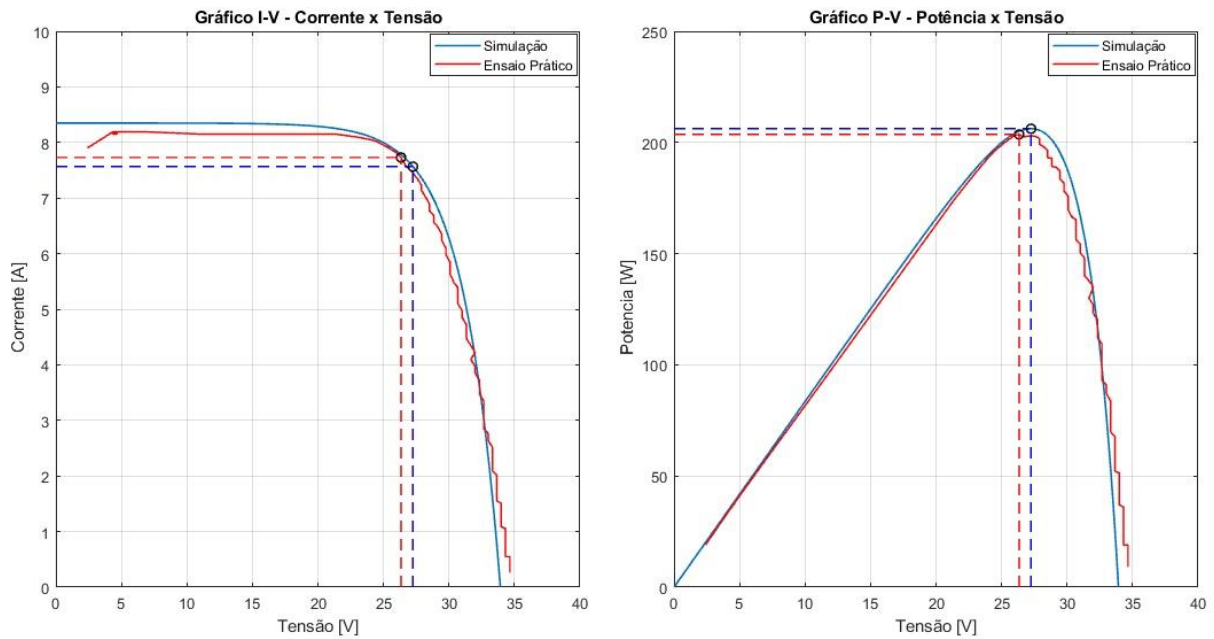


Figura 72 - Comparação curva obtida na prática (em vermelho) com a curva obtida na simulação (em azul), painel com orientação para o norte a 25°, em 17/04/2019 às 14h21min, temperatura de 54,5° C e irradiação estimada de 890 W/m². Fonte [Autor].

A análise das comparações realizadas acima valida a utilização da simulação computacional para efeitos teóricos, visto que a curva simulada (em azul) ficou muito próxima da curva real (em vermelho). As Tabelas 5 e 6 mostram os resultados da curva real e da simulação, respectivamente, enquanto a Tabela 7 mostra o erro da curva simulada em relação à curva real.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios com o módulo FV em diferentes inclinações. Fonte [Autor].

Data	Hora	Norte	I _{SC}	V _{OC}	V _{MPP}	I _{MPP}	P _{máx}	FF
12/04/19	13:09	0°	8,4400	32,6600	25,0900	7,7300	193,9457	0,7036
12/04/19	13:03	5°	8,5200	33,3300	25,4100	7,8500	199,4685	0,7024
12/04/19	13:14	10°	8,7700	32,6600	25,7200	7,9400	204,2168	0,7130
17/04/19	14:01	0°	7,5200	35,3100	27,2800	6,9800	190,4144	0,7171
17/04/19	14:13	5°	7,6400	34,9800	26,6500	7,1900	191,6135	0,7170
17/04/19	14:08	18°	9,1500	34,9800	26,6500	8,4000	223,8600	0,6994
17/04/19	14:21	25°	8,1900	34,6500	26,3400	7,7300	203,6082	0,7175

Tabela 6 – Resultados da simulação computacional com os mesmos parâmetros encontrados na prática. Fonte [Autor].

Data	Hora	Norte	I _{SC} simulação	V _{OC} simulação	V _{MPP} simulação	I _{MPP} simulação	P _{máx} simulação	FF simulação
12/04/19	13:09	0°	8,5555	32,6520	25,9740	7,6934	199,8298	0,7153
12/04/19	13:03	5°	8,6395	32,6760	25,9980	7,7703	202,0119	0,7156
12/04/19	13:14	10°	8,8914	32,7600	26,0760	7,9986	208,5709	0,7160
17/04/19	14:01	0°	7,5896	33,9960	27,3480	6,8861	188,3210	0,7299
17/04/19	14:13	5°	7,7103	34,0380	27,3900	6,9962	191,6264	0,7302
17/04/19	14:08	18°	9,233825	34,5420	27,8520	8,3914	233,7176	0,7328
17/04/19	14:21	25°	8,2677	34,2360	27,5700	7,5061	206,9434	0,7311

Diante dos resultados práticos e computacionais pode-se observar graficamente a proximidade entre as curva obtidas na simulação computacional com as curvas obtidas nos ensaios práticos, porém outra maneira de observar essa proximidade é através do cálculo analítico do erro dos valores simulados em relação aos valores práticos. A equação abaixo orienta o cálculo percentual deste erro.

$$Erro(\%) = \left(\frac{Valor_{simulação}}{Valor_{Real}} - 1 \right) \times 100 \quad (47)$$

Onde,

Valor_{simulação} Valor obtido através da simulação computacional;

Valor_{Real} Valor obtido através do ensaio prático com o caracterizador;

Erro (%) Erro percentual do valor simulado em relação ao valor real.

A equação (47) é genérica para calcular o erro percentual de qualquer valor obtido na simulação, logo para exemplificar a sua utilização será feito um exemplo calculando o erro entre a potência máxima obtida na 1ª linha/ 8ª coluna das Tabelas 5 e 6 como segue abaixo.

$$Erro(\%) = \left(\frac{P_{m\acute{a}x_{simula\c{c}\tilde{a}o}}}{P_{m\acute{a}x_{Real}}} - 1 \right) \times 100$$

$$Erro(\%) = \left(\frac{199,8298}{193,9457} - 1 \right) \times 100$$

$$Erro(\%) = 3,0339$$

Tabela 7 – Resultado das comparações realizadas entre a simulação computacional e os ensaios práticos. Fonte [Autor].

Data	Hora	Norte	Erro de I _{SC} (%)	Erro de V _{OC} (%)	Erro de V _{MPP} (%)	Erro de I _{MPP} (%)	Erro de P _{máx} (%)	Erro FF(%)
12/04/19	13:09	0°	1,3691	-0,0245	3,5233	-0,4727	3,0339	1,6672
12/04/19	13:03	5°	1,4029	-1,9622	2,3140	-1,0155	1,2751	1,8729
12/04/19	13:14	10°	1,3846	0,3062	1,3841	0,7377	2,1321	0,4297
17/04/19	14:01	0°	0,9251	-3,7213	0,2493	-1,3453	-1,0994	1,7816
17/04/19	14:13	5°	0,9206	-2,6930	2,7767	-2,6952	0,0067	1,8368
17/04/19	14:08	18°	0,9161	-1,252	4,510	-0,1022	4,4035	4,7675
17/04/19	14:21	25°	0,9488	-1,1948	4,6697	-2,8963	1,6380	1,9002

Frente aos resultados expostos, a análise da Tabela 7 mostra que os dados obtidos possuem um erro aceitável da simulação em relação à prática. Pode-se observar que o erro máximo não supera a 4,8%, sendo aceitável para uma simulação que desconsidera parâmetros de resistência em série e paralelo do circuito equivalente.

Dentro desse raciocínio a construção do caracterizador fotovoltaico atende aos requisitos propostos, que são baixo custo de implementação, simples construção e boa precisão, podendo ser utilizado para fins educacionais e em pesquisas de campo para coleta e análise de dados.

Os traçadores de curva comerciais em geral possuem um valor elevado o que inviabiliza a sua aplicação em estudos acadêmicos. Como exemplo de comparação, abaixo serão listados alguns analisadores de curva para módulos FV e seus respectivos preços.

- HT I-V400w, Voc 1000 V DC, Isc 15 A, P_{máx} de 7 kW [34]. O qual possui um valor de mercado de aproximadamente R\$ 16.655,00 + impostos [35];
- HT I-Ve, Voc 1500 V DC, Isc 15 A, P_{máx} de 10 kW [36]. O qual possui um valor de mercado de aproximadamente R\$ 20.359,00 + impostos [35];
- Kit Seaward PV150 teste solar, Voc 1000 V DC, Isc 15 A, P_{máx} de 10 kW [37]. O qual possui um valor de mercado de aproximadamente R\$ 6.250,00 + impostos [35];

O alto custo dos caracterizadores comerciais justifica-se pelo fato de serem fabricados para trabalhar com sistemas robustos de maior potência, o que inviabiliza um investimento para sistemas fotovoltaicos de baixa potência.

O caracterizador proposto tem como desvantagem a limitação em relação à potência, porém o seu custo é muito menor em relação aos comerciais. A Tabela 8, abaixo, mostra a estimativa de custo do caracterizador fabricado.

Tabela 8 – Estimativa de preço do sistema proposto. Fonte [Autor].

Quantidade	Componentes	Descrição	Valor	Total
1	Transformador c/ tap central	24 + 24 V , bivolt, 1 A	R\$ 32,00	R\$ 32,00
1	Regulador de tensão	7815 - (+) 15 Vcc	R\$ 1,40	R\$ 1,40
1	Regulador de tensão	7915 - (-) 15 Vcc	R\$ 1,40	R\$ 1,40
5	Diodos	1N4007	R\$ 0,10	R\$ 0,50
2	Capacitor eletrolítico	2200 uF , 35 V	R\$ 2,00	R\$ 4,00
1	Capacitor eletrolítico	1000 uF, 25 V	R\$ 0,60	R\$ 0,60
2	Capacitor cerâmico	100 nF, 50 V	R\$ 0,10	R\$ 0,20
1	Diodo emissor de Luz	LED - Verde/Azul	R\$ 0,15	R\$ 0,15
4	Conectores tipo borne	KRE 2 Vias	R\$ 2,50	R\$ 10,00
2	Conectores tipo borne	KRE 3 Vias	R\$ 3,50	R\$ 7,00
1	Soquete torneado	16 pinos	R\$ 1,65	R\$ 1,65
1	ULN2003A	CI transistorizado	R\$ 1,60	R\$ 1,60
1	Mosfet de Potência	IRFP260N	R\$ 8,50	R\$ 8,50
4	Resistores	1 kohm	R\$ 0,06	R\$ 0,24
1	resistores	100 ohm	R\$ 0,06	R\$ 0,06
1	resistores	4,7 kohm	R\$ 0,06	R\$ 0,06
1	resistores	4.7 kohm/2W	R\$ 1,50	R\$ 1,50
1	placa de fenolite	100 x 300 mm	R\$ 7,00	R\$ 7,00
1	Arduino Uno R3	10 bits	R\$ 59,50	R\$ 59,50
1	Placa condicionamento de sinais	Valor estimativo	R\$ 370,00	R\$ 370,00
			Total	R\$ 507,36

Frente ao exposto, nota-se que o preço do caracterizador proposto é baixo em relação aos caracterizadores comerciais. O valor da placa de condicionamento de sinais foi estimado em [38], logo este pode sofrer variação de acordo com o valor do dólar, que estava cotado na data atual em R\$ 3,96.

Dessa forma, torna-se viável a fabricação do caracterizador proposto, para estudos de sistemas fotovoltaicos de baixa potência para fins de estudos acadêmicos e outras aplicações dentro das limitações do MOSFET utilizado, no caso deste projeto para o IRFP260N os limites para V_{oc} , I_{sc} e $P_{máx}$ são, conforme [30]: 200 V, 46 A e 280 W respectivamente, enquanto que para o IRFP460N os limites são, conforme [33]: 500 V, 20 A e 280 W na mesma sequência.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este projeto apresentou um estudo sobre módulos fotovoltaicos e as suas características de funcionamento para condições climáticas fora do STC. Foram implementados um protótipo de caracterizador de curvas e uma simulação matemática com auxílio de computador, com a finalidade de comparar ambos os resultados.

A simulação computacional foi realizada utilizando o Método de Newton, por sua vez o protótipo foi construído através do método da carga eletrônica. A análise comparativa foi realizada graficamente e analiticamente, de modo que os resultados obtidos pela simulação ficaram muito próximos aos resultados dos ensaios de campo do protótipo construído, com erro não superior a 4,8%.

Outro fator relevante é o custo do caracterizador elaborado, pois esse possui valor irrisório quando comparado com analisadores de curva comerciais, visto que, o custo do protótipo construído equivale a 8,12% do caracterizador comercial mais barato que fora encontrado.

Frente ao exposto, o projeto atendeu às expectativas iniciais de construir um caracterizador didático, com boa precisão e baixo custo, que pode ser utilizado para a aquisição e comparação de dados.

Nessa perspectiva, o trabalho proporcionou ao discente uma experiência real com relação à construção de um projeto prático e suas dificuldades, sendo necessárias horas de estudo para resolver problemas com solução aparentemente simples, proporcionando um conhecimento empírico considerável, que por sua vez aumenta a confiança em relação a aplicações práticas.

No mesmo sentido as disciplinas que constam na matriz curricular do curso foram bastante utilizadas nesse projeto, tanto em sua concepção, quanto na solução de problemas encontrados as quais se destacam: Circuitos Elétricos I e II, Eletrônica Analógica I e II, Eletrônica de Potência, Algoritmos, Estrutura de Dados, Microcontroladores e Redes Industriais, que são apenas uma parte da extensa grade curricular na formação do engenheiro eletricista.

O projeto apesar de atender às expectativas iniciais, apresenta algumas vertentes para trabalhos futuros, tais como:

- Medição instantânea da irradiação e temperatura sobre o módulo FV, ou seja, no momento exato da caracterização;
- Aumentar a potência do sistema, trocando a carga eletrônica por uma de maior robustez;
- Realizar comunicação wireless;
- Comparação do caracterizador proposto com um caracterizador comercial;
- Determinação de parâmetros do módulo FV, como, R_s e R_p ;
- Estudos sobre o controle da máxima potência.

Ao se realizar um projeto prático são encontradas inúmeras dificuldades, pois algumas soluções não estão prontas e demandam tempo, estudo e persistência. O conhecimento obtido durante a realização desse projeto é perceptível quando comparado com o marco zero, sendo assim é possível afirmar que o trabalho de conclusão de curso é de suma importância para a formação do engenheiro.

REFERÊNCIAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 3ª ed. 2008. Disponível em: < http://www.fisica.net/energia/atlas_de_energia_eletrica_do_brasul_3a-ed.pdf >. Acesso em: 20 de Julho de 2018.
- [2] PEREIRA, S. S.; CURI, R. C. **Meio Ambiente, Impacto Ambiental e Desenvolvimento Sustentável: Conceituações Teóricas sobre o Despertador da Consciência Ambiental – REUNIR - Revista de Administração, Contabilidade e Sustentabilidade** Vol. 2, Nº 4, p. 35-57, 2012.
- [3] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, 2ª ed. 2017. Disponível em: < http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf >. Acesso em: 17 de Junho de 2018.
- [4] BOMBANA, C. **A Vez do Sol na produção de Energia Elétrica, FotoVolt Ed. especial N. 1, pág. 14, Eletricidade Moderna** – EM. Geração Fotovoltaica um mercado prestes a decolar, Agosto de 2015.
- [5] Brito, E. M. da S. – **Construção de um Caracterizador Solar baseado em Carga Capacitiva**. Viçosa: UFV, 2014.
- [6] Carvalho, A. L. C. DE. – **Metodologia para Análise, Caracterização e Simulação de Células Fotovoltaicas**. Belo Horizonte, UFU, 2014.
- [7] CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SERGIO DE SALVO BRITO – CRESESB. **Energia Solar princípios e Aplicações**. Disponível em: < http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf > Acesso em: 20 de Junho de 2018.
- [8] CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SERGIO DE SALVO BRITO – CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. ed Revisada e Atualizada, 2014. Disponível em: < <https://www.portal-energia.com/downloads/livro-manual-de-engenharia-sistemas-fotovoltaicos-2014.pdf> > Acesso em: 26 de Junho de 2018.
- [9] MINISTÉRIO DE MINAS ENERGIA – MME. **Qualidade em Instalações de Aquecimento Solar Boas Práticas**, 2009. Disponível em: < http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Qualidade_em_Instalacoes_de_Aquecimento_Solar.pdf > Acesso em: 30 de Julho de 2018.
- [10] SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR KOMEKO. **Manual do Usuário e de Instalação**, 2017. Disponível em: <

https://www.komeco.com.br/fmanager/komeco2017/manuais_produtos/arquivo27_1.pdf >
Acesso em: 30 de julho de 2018.

[11] INSTITUTO EKOS BRASIL, VITAE CIVILIS. **Introdução ao Sistema de Aquecimento Solar, 2010.** Disponível em: <
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/60551/mod_resource/content/1/Apostila_Aquecimento_Solar.pdf > Acesso em: 30 de Julho de 2018.

[12] REN21. **RENEWABLES 2018 GLOBAL STATUS REPORT.** Disponível em: <
http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/178652_GSR2018_FullReport_web_final_.pdf > Acesso em: 15 de Agosto de 2018.

[13] Meyer, R. **Os 10 maiores fabricantes de Painel Solar do Mundo - 2018.** Disponível em: < <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/painel-solar/os-10-maiores-fabricantes-de-painel-solar-em-2017.html> > Acesso em: 14 de Agosto de 2018.

[14] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL – **Caderno Temático Micro e Minigeração Distribuída Sistema de Compensação de Energia Elétrica, 2ª ed. 2018.** Disponível em: <
<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161> >
Acesso em: 20 de Agosto de 2018.

[15] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL – **ANNEEL Amplia Possibilidades para Micro e Minigeração, 2015.** Disponível em: <
http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=8955&id_area=90 > Acesso em: 23 de Agosto de 2018.

[16] Almeida. E., et al. **Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica, 2015.** Artigo publicado na Revista Engenharias Online da Universidade Fumec. Disponível em <
<http://fumec.br/revistas/eol/article/view/3574/1911> > Acesso em: 20 de Agosto de 2018.

[17] NEOSOLAR – **Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica e Seus Componentes.** Disponível em: < <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes> > Acesso em: 20 de Agosto de 2018.

[18] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL – **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição, Rev. nº 724/2016.** Disponível em: <
http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/PRODIST-M%C3%B3dulo3_Revis%C3%A3o7/ebfa9546-09c2-4fe5-a5a2-ac8430cbca99 > Acesso em: 23 de Agosto de 2018.

[19] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL – **Informações Gerenciais, Março de 2018.** Disponível em: <
<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%A3o> >

B5es+Gerenciais+-+1%C2%BA+trimestre+2018/01298785-3069-c0e7-d9c8-a2cca07cddd9
> Acesso em: 24 de Agosto de 2018.

[20] BASSALDO, J. M. F. – **A Crônica da Física do estado sólido: III. Teoria de Bandas***. Departamento de Física, Universidade Federal do Pará, 1992, publicado na Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 16, 1994.

[21] CARNEIRO, J. – **Semicondutores – Modelo Matemático da Célula Fotovoltaica**. Portugal, Universidade do Minho Campus Azurém, 2010.

[22] CARNEIRO, J. – **Módulos Fotovoltaicos Características e Associações**. Portugal, Universidade do Minho Campus Azurém, 2010.

[23] Luna, M. L. M.; Carvalho, P. C. M. - **Desenvolvimento e Validação de Traçador de Curva IxV para Módulos Fotovoltaicos Usando o Método da Carga Eletrônica**. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, publicado na Revista Brasileira de Energia Solar Ano 8 Volume VIII Número 2 Dezembro de 2017 p. 88-99.

[24] XIAO, W. – **Photovoltaic Power Sistem, Modeling, Desing, and Control**. Australia, University of Sydney, 2017.

[25] RENOVIGI – **“Módulo Policristalino 60x6”/270 W” Risen Energy**. Disponível em: <https://renovigi.com.br/system/produtos/catalogos/000/000/002/original/Painel_Solar_270.pdf?1533816065> acesso dia 01 de Março de 2019.

[26] Almeida, P. S. – **Eletrônica Analógica CEL099**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Disponível em: <http://www.ufjf.br/pedro_almeida/files/2015/04/CEL099-%E2%80%93005-Transistores-de-Efeito-Campo-MOS-MOSFET.pdf> Acesso em: 30 de Outubro de 2018.

[27] LEM, “Transdutor de Tensão LV 20-P”- **LEM International SA**. Disponível em: <<https://datasheet.octopart.com/LV-20-P-LEM-datasheet-144785.pdf>> acesso dia 28 de Fevereiro de 2019.

[28] LEM, “Transdutor de Corrente LA 55-P” – **LEM International SA**. Disponível em: <<https://datasheet.octopart.com/LA-55-P-LEM-datasheet-14709090.pdf>> acesso dia 28 de Fevereiro de 2019.

[29] Viajante, G. P. – **Gerador A Relutância Variável Em Conexão Com a Rede Elétrica Para Injeção de Potência Ativa**. Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 2013.

[30] Vishay – **“ Datasheet IRFP260N ” Vishay Siliconix**. Disponível em: <<https://www.vishay.com/docs/91215/91215.pdf>> acesso dia 02 de Março de 2019.

[31] Instruments – **“ Datasheet ULN2003A” Texas Instruments**. Disponível em <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uln2003a.pdf>> acesso dia 05 de Março de 2019.

[32] Nilsson, J. W; Riedel, S. A. – **Circuitos Elétricos**. 8 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

[33] IOR RECTIFIER – “ **Datasheet IRFP460N ” Ior Rectifier International**. Disponível em: <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfp460n.pdf> > acesso dia 02 de Março de 2019.

[34] HT – “**Datasheet HT I-V400w Rev. 1 15/05/2017**” **HT Instruments**. Disponível em < <https://www.ht-instruments.com/en/products/i-v400w/download/datasheet/>> acesso dia 02 de Maio de 2019.

[35] TEquipment – **I-V400w preço do equipamento**. Disponível em < <https://www.tequipment.net/> > acesso dia 02 de Maio de 2019.

[36] HT – “**Datasheet HT I-Ve Rev. 15/05/2017**” **HT Instruments**. Disponível em < <https://www.ht-instruments.com/en/products/solar-i-ve/download/datasheet/>> acesso dia 02 de Maio de 2019.

[37] SEAWARD – “**Solar Installation PV150 Operating Instructions Rev. 5, April de 2017**” **Seaward Solar**. Disponível em < http://www.seawardsolar.com/downloads/pv150_manual_v5.pdf > acesso dia 02 de Maio de 2019.

[38] Newark AN AVNET COMPANY – **Estimativa de preço componentes da placa de condicionamento de sinais**. Disponível em < <https://www.newark.com/> > acesso dia 02 de Maio de 2019.

Apêndice A – Método de Newton, utilizado para obtenção da curva característica dos módulos fotovoltaicos.

O método de Newton é uma das técnicas mais populares para se determinar raízes de equações não lineares. A forma mais simples de entendê-lo é interpretando-o geometricamente, como visto na Figura 73.

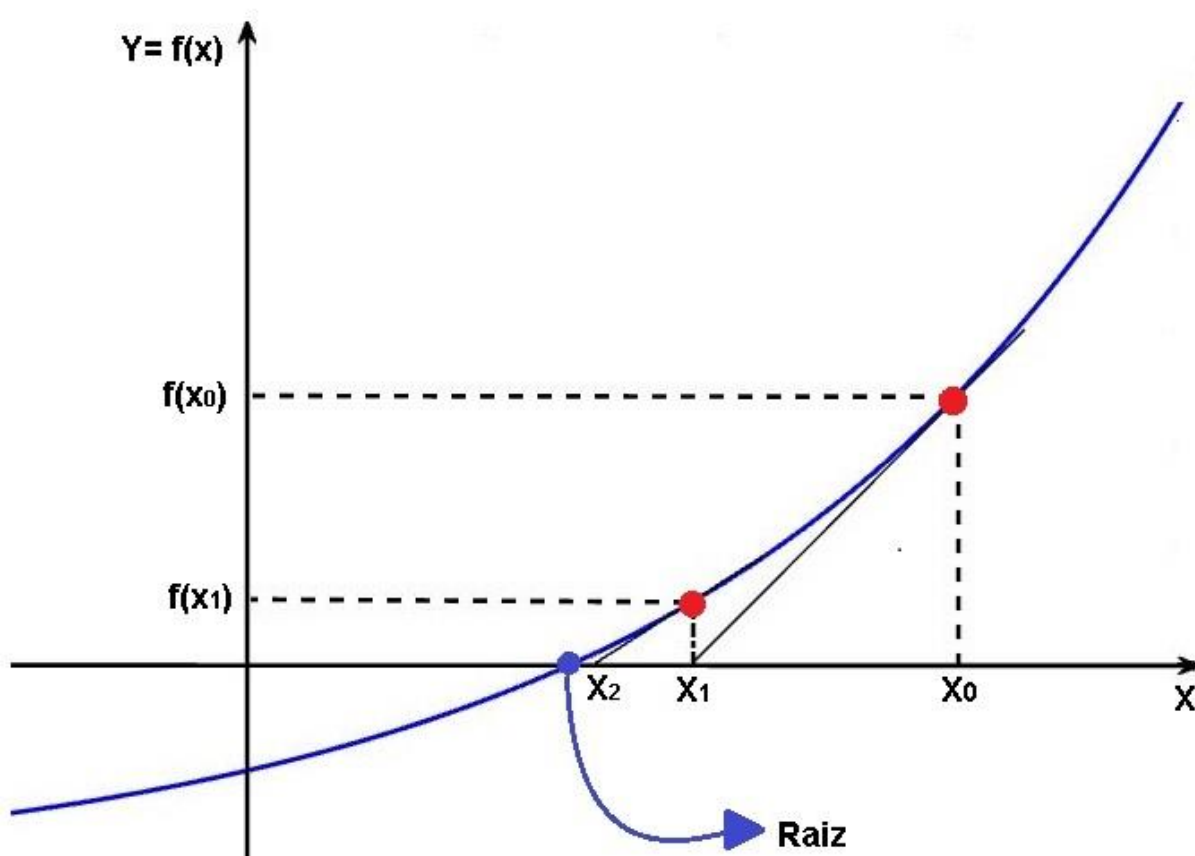


Figura 73 - Interpretação geométrica do Método de Newton.
Fonte [Autor].

Este método utiliza aproximações com o auxílio da reta tangente, a partir de um ponto inicial, este ponto é determinado “chute inicial”, observando no gráfico a coordenada inicial é x_0 que leva ao ponto inicial $(x_0, f(x_0))$. Com o auxílio da reta tangente que passa por esse ponto é encontrado o ponto $(x_1, f(x_1))$, que por sua vez está mais próximo da raiz da equação.

Continuando o processo iterativo ao traçar uma reta tangente ao novo ponto será encontrado outro ponto $(x_2, f(x_2))$, que está mais próximo da raiz da equação do que o ponto anterior, portando se continuarmos as aproximações estaremos cada vez mais próximos da solução para esta equação.

Após a interpretação geométrica, consegue-se chegar de forma simples a uma equação que represente o método. A equação geral da reta tangente ao ponto genérico será utilizada.

$$y - y_0 = m \cdot (x - x_0) \quad (48)$$

Onde, m é o coeficiente angular da reta tangente ao ponto genérico (x_0, y_0) , porém sabe-se que o coeficiente angular de uma reta pode ser interpretado como a derivada no ponto, ou seja, $m = \frac{df(x_0)}{dx} = f'(x_0)$.

$$y - f(x_0) = f'(x_0) \cdot (x - x_0) \quad (49)$$

De acordo com o método deseja-se encontrar a raiz, ou seja, o ponto em que $f(x) = 0$, logo:

$$0 - f(x_0) = f'(x_0) \cdot (x - x_0) \quad (50)$$

Rearranjando a equação (50), temos:

$$x = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (51)$$

Observa-se na Figura 24 que a coordenada “ x ” encontrada através de um chute inicial x_0 é denominado x_1 e assim sucessivamente, para tanto modificando a equação (51) têm-se:

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (52)$$

Os sufixos referem-se à quantidade de vezes em que foi necessária a utilização de uma aproximação pela reta tangente onde o chute inicial tem sufixo 0, este conceito é denominado iteração, ou seja, a quantidade de aproximações feitas. Sendo assim temos uma equação geral para utilização do Método de Newton, que foi a referência utilizada no fluxograma da Figura 24, este método também é conhecido como método das tangentes.

$$x_{(n)} = x_{(n-1)} - \frac{f(x_{(n-1)})}{f'(x_{(n-1)})} \quad (53)$$

Onde, n é o numero da iteração.

Dessa maneira podemos observar que assim como na maioria dos métodos numéricos deveremos estipular um erro, que se trata de um critério de parada, onde o processo de aproximação irá cessar. Dessa maneira para calcular o erro deve-se analisar a proximidade com a solução da equação, na equação (52), quanto mais próximo da solução mais próximos os valores absolutos de x_0 e x_1 , como podem ser observados em (54).

$$x_{(n)} - x_{(n-1)} = - \frac{f(x_{(n-1)})}{f'(x_{(n-1)})} \quad (54)$$

Logo, se observa que, quando $f(x_{(n-1)}) \cong 0$, os valores absolutos de $x_{(n)} - x_{(n-1)} \cong 0$, assim o erro pode ser calculado pela seguinte equação:

$$Erro = |x_{(n)} - x_{(n-1)}| \quad (55)$$

O método utilizado no fluxograma da Figura 23 foi traduzido em linhas de programação utilizando o software MATLAB. O código criado é mostrado abaixo.

```

%% Teste: ISDM - Ideal modelo com um diodo - Pannel RENOVIG - RM60-6-270P -
60X6"/270W - Módulo Policristalino;
%% Método de Newton Raphson
%% Aluno: Luiz Carlos Lourenço da Silva
%% Professor: Ghunter Paulo Viajante
clc
clear all
close all
format long;
k = 1.38*10^-23;      % Constante de Boltzmann
q = 1.6*10^-19;      % Carga do elétron;
Tcs = 298;           % Temperatura da célula em STC*
Vms = 0.52;          % Tensão no ponto de máxima potência em condições de
teste (laboratório)
Vocs = 0.64;          % Tensão de circuito aberto em condições de
laboratório;
Vtcs = k*Tcs/q;       % Tensão termica da junção p-n;
Ims = 8.66;           % Corrente de máxima potência em condições normais de
teste STC*
MPP = 4.5;
Iscs = 9.2;           % Corrente de curto circuito em      ''      ''
'' '' ''
Vpv = [0:0.0001:Vocs]; % Variação da Tensão de saída (Modelo Ideal com um
diodo)
C1 = Vms/Vtcs;
C2 = Vocs/Vtcs;
C3 = 1 - Ims/Iscs;
Ainv = 0.7;           %% Chute Inicial para Ainv. ' De acordo com o metodo
de Newton Rapshon'
% An=1/Ainv;          %% Ode An= Fator de idealidade do diodo
FAinv = exp(C1*Ainv) - C3*exp(C2*Ainv) + C3 - 1;
%FAinv = exp(C1*Ainv) - C3*exp(C2*Ainv);
dAinv = C1*Ainv*exp(C1*Ainv)-C2*C3*exp(C2*Ainv); % Derivada de F(An1)
Erro = 1;              % Iniciando o valor do Erro;
iteracoes = 1000;     % Número de iterações;
for n=1:iteracoes
    if(Erro > 1e-8)
        if(n==1)
            Ainv(n)=0.7;          % Determinação dos Valores Iniciais, pois o
Matlab não possui posição zero no vetor;
            FAinv(n)=FAinv;       %
            %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
            %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
            %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
            dAinv(n)=dAinv;       %
            %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
            %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
            %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
            %Erro = abs(exp(C1*Ainv(n)) - C3*exp(C2*Ainv(n)));
        else
            Ainv(n) = Ainv(n-1) - (FAinv(n-1))/dAinv(n-1);
% Atualizando os dados de acordo com a iteração anterior;
            FAinv(n) = exp(C1*Ainv(n-1)) - C3*exp(C2*Ainv(n-1)) + C3 - 1;
% Atualizando a função FAinv;
            dAinv(n) = C1*Ainv(n-1)*exp(C1*Ainv(n-1))-C2*C3*exp(C2*Ainv(n-1));
% Atualizando a derivada da função dAinv;
            %Erro = abs(exp(C1*Ainv(n-1)) - C3*exp(C2*Ainv(n-1)));
            Erro = abs(Ainv(n)-Ainv(n-1));
        end
    end
    if(Erro < 1e-6)
        aux = Ainv(n);
        C4 = q*aux/(k*Tcs);
    end
end

```

```

        Iss = Iscs/(exp(C2*aux) - 1);
        Ipv = Iscs - Iss*(exp(C4*Vpv) - 1);
        Ppv = Vpv.*Ipv;
        parou = n; % Iteração onde foi encontrada a melhor
aproximação;
        n = iteracoes;
    end
end

end

%% Encontrar a posição onde a potência é máxima;
for n=1:length(Ppv)
    Mppcalc = max(Ppv);
    if(Ppv(n)==Mppcalc)
        posicao = n;
        n = length(Ppv);
    end
end

Dmpp = sqrt((Ppv(posicao)/MPP-1)^2 + (Vpv(posicao)/Vms-1)^2);
%Ipv(length(Ipv))==0;
plot(60*Vpv, Ipv, 'linewidth', 2);
grid on;
title('Gráfico V-I ');
xlabel(' Tensão [V] ');
ylabel(' Corrente [A] ');

figure()
plot(60*Vpv, 60*Ppv, 'linewidth', 2);
grid on;
title('Gráfico V-P ');
xlabel(' Tensão [V] ');
ylabel(' Potência da Célula [W] ');

```

De maneira similar, foi criada uma rotina em MATLAB para demonstrar o efeito da variação de temperatura e irradiação em um módulo fotovoltaico, mostrada no Fluxograma da Figura 24 e nas Figuras 25 e 26 do Capítulo 3. Segue abaixo a rotina de programação:

```

%% Teste: ISDM - Ideal modelo com um diodo - Painel RENOVIG - RM60-6-270P -
60X6"/270W - Módulo Policristalino;
%% Variação da Irradiação e da Temperatura - considera An constante = 1.65
Calculado para STC;
%% Aluno: Luiz Carlos Lourenço da Silva
%% Professor: Ghunter Paulo Viajante
clc
clear all
close all
format short;
Eg = 1.12; % Band Gap, Energia necessária para levar um
elétron até a banda de condução.
k = 1.38*10^-23; % Constante de Boltzmann
q = 1.6*10^-19; % Carga do elétron;
Tcs = 298; % Temperatura da célula em STC*
ncs = 60; % Número de células associadas em série

```

```

ncp = 1; % Número de células associadas em paralelo
Vms= 0.52; % Tensão no ponto de máxima potência em
condições de teste (laboratório)
Vocs= (38.2/60); % Tensão de circuito aberto em condições de
laboratório;
Vtcs = k*Tcs/q; % Tensão termica da junção p-n;
Ims = 8.66; % Corrente de máxima potência em condições
normais de teste STC*
MPP = 4.5; % Máxima potência de uma célula em STC*
Iscs = 9.2; % Corrente de curto circuito em ''
'' '' '' ''
alphaT = (0.033/100); % Coeficiente de correção de temperatura;
[A/A]/k; a divisão por 274 é devido ao datasheet estar em (%/°C);
betaT = (-0.33/100); % Coeficiente de correção de tensão;
lambidaT = (-0.39/100); % Coeficiente de correção de potência;
An = 1.65; % Encontrado com o método de Newton em STC* e
considerado CTE.
Ainv = 1/An;
Vpv = [0:0.001:Vocs]; % Variação da Tensão de saída (Modelo Ideal
com um diodo)
Eamedido = [1000 800 600 200]; % Vetor para
variação da Irradiancia.
%Eamedido = 1000;
Estc = 1000; %
Irradiancia STC
%Tc = [(273 -25) (273 + 0) (273 + 25) (273 + 50)]; % Vetor para
variação da temperatura.
%Tc = [(273 + 0) (273 + 25) (273 + 50) (273 + 70)]
Tc = 298; %
Temperatura Medida.
Tstc = 298; %
Temperatura em STC*;
deltaT=(Tc - Tstc); % Diferença
entre Tc e Tstc;
Iph = (Eamedido/Estc)*Iscs*(1 + alphaT*(deltaT)); % Corrente
fotovoltaica variando com a temperatura e Irradiação.

for i=1:length(Eamedido)
    deltaT=(Tc - Tstc);
    Iph(i) = (Eamedido(i)/Estc)*Iscs*(1 + alphaT*(deltaT));
% Corrente fotovoltaica variando com a temperatura.
    %Vt(i) = X(1)*Eamedido(i)^2 + X(2)*Eamedido(i) + X(3);
% Correção, coeficiente de irradiação em tensão.
    %Voc(i) = Vocs*(1 + betaT*deltaT)*Vt(i);
% Correção da tensão de circuito aberto para irradiancia.
    Istc = Iscs/(exp((q*Vocs)/(k*Tc*An))-1);
% Corrente de saturação em STC, considerando An CTE.
    Istemp = Istc*((Tc/Tstc)^3)*exp(((Eg*q)/(An*k))*((1/Tstc) - (1/Tc)));
% Corrente de saturação depende apenas da temperatura.
    Voc(i) = Vtcs*An*log((Iph(i)/Istemp) + 1);
% Calculo de Voc depende da radiação e da temperatura.
    Iss = Iph(i)/(exp((q*Voc(i))/(k*Tc*An))-1);
% calculo da corrente de saturação para Voc.
    Vpv = [0:0.0001:Voc(i)];
% corrigindo o valor de Voc;
    Ipv = Iph(i) - Iss.*(exp((q.*Vpv)/(k*Tc*An))-1);
% condições atuais de temperatura e radiação.
    Vpv = ncs*Vpv;
    Ipv = ncp*Ipv;
    Ppv = Vpv.*Ipv;

```

```

figure(1)
if(i==1)
    subplot(1,2,1)
    plot(Vpv,Ipv,'k','linewidth',2)
    hold on
    grid on
    title('Gráfico I-V com temperatura CTE e irradiância variável')
    xlabel(' Tensão [V] ')
    ylabel(' Corrente [A] ')
    axis([0 40 0 10])
end
if(i==2)
    subplot(1,2,1)
    plot(Vpv,Ipv,'b','linewidth',2)
    hold on
    grid on
    title('Gráfico I-V com temperatura CTE e irradiância variável')
    xlabel(' Tensão [V] ')
    ylabel(' Corrente [A] ')
    axis([0 40 0 10])
end
if(i==3)
    subplot(1,2,1)
    plot(Vpv,Ipv,'g','linewidth',2)
    hold on
    grid on
    title('Gráfico I-V com temperatura CTE e irradiância variável')
    xlabel(' Tensão [V] ')
    ylabel(' Corrente [A] ')
    axis([0 40 0 10])
end
if(i==4)
    subplot(1,2,1)
    plot(Vpv,Ipv,'r','linewidth',2)
    hold on
    grid on
    title('Gráfico I-V com Temperatura CTE e irradiância variável')
    xlabel(' Tensão [V] ')
    ylabel(' Corrente [A] ')
    axis([0 40 0 11])
    legend('1000 W/m²',' 800 W/m²',' 600 W/m²',' 200 W/m²')
end
figure(1)
if(i==1)
    subplot(1,2,2)
    plot(Vpv,Ppv,'k','linewidth',2)
    hold on
    grid on
    title('Gráfico P-V com Temperatura CTE e irradiância variável')
    xlabel(' Tensão [V] ')
    ylabel(' Potência [W] ')
    axis([0 40 0 350])
end
if(i==2)
    subplot(1,2,2)
    plot(Vpv,Ppv,'b','linewidth',2)
    hold on
    grid on
    title('Gráfico P-V com temperatura CTE e irradiância variável')
    xlabel(' Tensão [V] ')

```

```

        ylabel(' Potência [W]')
        axis([0 40 0 350])
    end
    if(i==3)
        subplot(1,2,2)
        plot(Vpv,Ppv,'g','linewidth',2)
        hold on
        grid on
        title('Gráfico P-V com temperatura CTE e irradiância variavel')
        xlabel(' Tensão [V] ')
        ylabel(' Potência [W]')
        axis([0 40 0 350])
    end
    if(i==4)
        subplot(1,2,2)
        plot(Vpv,Ppv,'r','linewidth',2)
        hold on
        grid on
        title('Gráfico P-V com Temperatura CTE e irradiância variável')
        xlabel(' Tensão [V] ')
        ylabel(' Potência [W]')
        axis([0 40 0 320])
        legend('1000 W/m²',' 800 W/m²',' 600 W/m²',' 200 W/m²')
    end
end

%% Variando apenas a Temperatura. Obs. " Devem ser comentadas algumas
variáveis "

% for i=1:length(Tc)
%     deltaT(i) =(Tc(i) - Tstc);
% Diferença entre a temperatura stc e a real.
%     Iph(i) = (Eamedido/Estc)*Iscs*(1 + alphaT*(deltaT(i)));
% Corrente fotovoltaica variando com a temperatura.
%     %Vt(i) = X(1)*Eamedido^2 + X(2)*Eamedido + X(3);
% Correção, coeficiente de irradiação em tensão.
%     %Voc(i) = Vocs*(1 + betaT*deltaT(i))*Vt(i);
% Correção da tensão de circuito aberto para irradiância.
%     Istc = Iscs/(exp((q*Vocs)/(k*Tstc*An))-1);
% Corrente de saturação em STC, considerando An CTE.
%     Istemp(i) = Istc*((Tc(i)/Tstc)^3)*exp(((Eg*q)/(An*k))*((1/Tstc) -
(1/Tc(i)))); % Corrente de saturação depende apenas da temperatura.
%     Vtc = k*Tc(i)/q;
% Cálculo do potencial térmico.
%     Voc(i) = Vtc*An*log((Iph(i)/Istemp(i)) + 1);
% Cálculo de Voc depende da radiação e da temperatura.
%     Iss = Iph(i)/(exp((q*Voc(i))/(k*Tc(i)*An))-1);
% cálculo da corrente de saturação para Voc.
%     Vpv = [0:0.0001:Voc(i)];
%     Ipv = Iph(i) - Iss.*(exp((q.*Vpv)/(k*Tc(i)*An))-1);
% condições atuais de temperatura e radiação.
%     Vpv = ncs*Vpv;
%     Ipv = ncp*Ipv;
%     Ppv = Vpv.*Ipv;
%     figure(1)
%     if(i==1)
%         subplot(1,2,1)
%         plot(Vpv,Ipv,'k','linewidth',2)
%         hold on
%

```

```

% end
% if(i==2)
%     subplot(1,2,1)
%     plot(Vpv,Ipv,'b','linewidth',2)
%     hold on
% end
% if(i==3)
%     subplot(1,2,1)
%     plot(Vpv,Ipv,'g','linewidth',2)
%     hold on
% end
% if(i==4)
%     subplot(1,2,1)
%     plot(Vpv,Ipv,'r','linewidth',2)
%     hold on
%     grid on
%     title('Gráfico I-V Irradiância CTE e Temperatura variável')
%     xlabel(' Tensão [V] ')
%     ylabel(' Corrente [A] ')
%     axis([0 45 0 11])
%     legend(' 0°C',' 25°C',' 50°C',' 70°C')
% end
% figure(1)
% if(i==1)
%     subplot(1,2,2)
%     plot(Vpv,Ppv,'k','linewidth',2)
%     hold on
% end
% if(i==2)
%     subplot(1,2,2)
%     plot(Vpv,Ppv,'b','linewidth',2)
%     hold on
% end
% if(i==3)
%     subplot(1,2,2)
%     plot(Vpv,Ppv,'g','linewidth',2)
%     hold on
% end
% if(i==4)
%     subplot(1,2,2)
%     plot(Vpv,Ppv,'r','linewidth',2)
%     hold on
%     grid on
%     title('Gráfico P-V Irradiância CTE e Temperatura variável')
%     xlabel(' Tensão [V] ')
%     ylabel(' Potência [W] ')
%     axis([0 45 0 350])
%     legend(' 0°C',' 25°C',' 50°C',' 70°C')
% end
% end
% % Encontrar a posição onde a potência é máxima;
% for n=1:length(Ppv)
%     Mppcalc = max(Ppv);
%     if(Ppv(n)==Mppcalc)
%         posicao = n;
%         n = length(Ppv);
%     end
% end
% end

```

Apêndice B – Algoritmos utilizados na IDE do Arduino e GUIDE do MATLAB.

A implementação e utilização dos algoritmos já foi discutida em 4.3, logo esse apêndice tem como objetivo apresentar as linhas de código utilizadas para programar o Arduino e a interface gráfica do MATLAB.

O primeiro algoritmo apresentado será o da programação do Arduino, ou seja, os comandos que devem ser realizados no momento em que a sua comunicação serial entre o controlador e o MATLAB é iniciada. Segue abaixo as linhas de código brevemente comentadas.

```
int parou = 0; // Iniciando Variável de parada parou = 0;

##### Iniciando as portas I/O e a velocidade de comunicação serial#####

void setup() {

    Serial.begin(57600);
    pinMode(7,OUTPUT);
    pinMode(8,OUTPUT);
    pinMode(A0,INPUT);
    pinMode(A1,INPUT);
    pinMode(10,OUTPUT);
    digitalWrite(7,LOW);
    digitalWrite(8,HIGH);
    delay(1000);

}

void loop() {

    int tensaobin, correntebin,i, aux_tensaobin, aux_correntebin, pos, b;
    float tensao_placa,corrente_placa, tensao_real, corrente_real,
    range_v = 0.0,range_c= 0.0 ,offset_v = 0.0, offset_c = 0.0;
    float vet_v[400], vet_c[400], potencia[400], vmax, imax, pmax,
    aux_vreal,    aux_creal, aux_potencia;
    vmax = 0.0;
    imax = 0.0;
    pmax = 0.0;

    ##### Aguardando a Comunicação Serial com o MATLAB #####

    while((!Serial.find('1'))&&(parou == 0)) // Condição de Espera
    {
        digitalWrite(7,LOW);
```

```

    digitalWrite(8,HIGH);
}
digitalWrite(7,LOW);
digitalWrite(8,LOW);    //nível lógico para carregar o capacitor
delay(10000);           //Aguarda 10s para carregar o capacitor
teste = 1;              //Condição de parada

//##### Descarregando o Capacitor #####//

digitalWrite(8,HIGH);
for(pos =0; pos<400; pos ++)    // Inicia aquisição de dados
{
    aux_tensaobin = 0;
    aux_correntebin = 0;

//##### Somatório para a realização da média de 50 leituras #####//

    for(i = 0; i<50; i++)
    {
        tensaobin = analogRead(A0);
        correntebin = analogRead(A1);
        //delayMicroseconds(248);
        aux_tensaobin = tensaobin + aux_tensaobin;
        aux_correntebin = correntebin + aux_correntebin;
    }

//##### Calculo da Corrente e Tensão Reais #####//

    tensaobin = aux_tensaobin/i;    //Média das leituras Binarias de V
    correntebin = aux_correntebin/i; //Média das leituras binarias C
    tensao_placa = (tensaobin*(5.0/1023.0));
    corrente_placa = (correntebin*(5.0/1023.0));

//##### Range de Tensão e Corrente #####//

    range_v = 65.921;
    range_c = 8.5382;
    offset_v = range_v*1.44;
    offset_c = range_c*1.48;

//##### Calculo da tensão Real #####//

    if(tensao_placa <1.45)
        tensao_real = 0.0;
    else if(tensao_placa <1.52)
        tensao_real = tensao_placa*66.398 - 95.606;
    else if(tensao_placa < 1.61)
        tensao_real = 64.592*tensao_placa - 92.784;
    else if(tensao_placa <1.76)
        tensao_real = 65.046*tensao_placa - 93.617;
    else if(tensao_placa < 1.91)
        tensao_real = 63.808*tensao_placa - 91.232;

```

```

else if(tensao_placa < 2.07)
    tensao_real = 67.717*tensao_placa - 98.732;
else if(tensao_placa < 2.21)
    tensao_real = 67.082*tensao_placa - 97.64;
else if(tensao_placa < 2.4)
    tensao_real = 65.077*tensao_placa - 93.107;

//##### Calculo da Corrente Real #####//

if(corrente_placa <1.49)
    corrente_real = 0.0;
else
    corrente_real = corrente_placa*range_c - offset_c;
vet_v[pos] = tensao_real;
vet_c[pos] = corrente_real;
potencia[pos] = vet_v[pos]*vet_c[pos];
if(vet_v[pos]>vmax)
    vmax = vet_v[pos];
if(vet_c[pos]>imax)
    imax = vet_c[pos];
if(potencia[pos]>pmax)
    pmax = potencia[pos];

//## Leitura no Monitor Serial para que o MATLAB Faça a aquisição dos dados e
      "plot" os gráficos ##//

Serial.print(tensao_placa);
Serial.print("      ");
Serial.print(tensao_real);
Serial.print("      ");
Serial.print(corrente_placa);
Serial.print("      ");
Serial.println(corrente_real);
}

//##### Loop de parada #####//

while(parou == 1)          //Condição de Parada
{
    ;
}

}

```

O segundo algoritmo apresentado é o da interface gráfica que foi feita utilizando a ferramenta GUIDE do MATLAB, essa ferramenta tem como característica a programação associada a eventos, ou seja, para cada estrutura gráfica na Figura 44 existe um evento associado à mesma. Abaixo segue o código com linhas brevemente comentadas.

```

function varargout = Caracterizador_Curvas(varargin)
% Caracterizador_Curvas MATLAB code for Caracterizador_Curvas.fig
%   Caracterizador_Curvas, by itself, creates a new Caracterizador_Curvas
or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = Caracterizador_Curvas returns the handle to a new
Caracterizador_Curvas or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   Caracterizador_Curvas('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls
the local
%   function named CALLBACK in Caracterizador_Curvas.M with the given
input arguments.
%
%   Caracterizador_Curvas('Property','Value',...) creates a new
Caracterizador_Curvas or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before Caracterizador_Curvas_OpeningFcn gets
called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to Caracterizador_Curvas_OpeningFcn via
varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Caracterizador_Curvas

% Last Modified by GUIDE v2.5 02-Apr-2019 14:21:51

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Caracterizador_Curvas_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Caracterizador_Curvas_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Caracterizador_Curvas is made visible.
function Caracterizador_Curvas_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.

```

```

% hObject      handle to figure
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin     command line arguments to Caracterizador_Curvas (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Caracterizador_Curvas
%%
% Iniciando a Interface Gráfica
%%
handles.output = hObject;
clc
axes(handles.axes1)
cla reset;
axes(handles.axes2)
cla reset;
axes(handles.axes3)
imshow('C:\Users\Luiz Carlos\Desktop\Tcc - Word\Comunicação Serial em
Linguagem Gráfica\IFG.jpg');
handles.voc.String = ' ';
handles.isc.String = ' ';
handles.vmpp.String = ' ';
handles.impp.String = ' ';
handles.pmax.String = ' ';
handles.ff.String = ' ';
handles.SELEZIONACOM.Value = 1;
handles.feedback_comunicacao.String = 'Aguardando Comunicação... ';
handles.feedback_comunicacao.ForegroundColor = 'Blue ';
handles.feedback_comunicacao.BackgroundColor = 'White';
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Caracterizador_Curvas wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Caracterizador_Curvas_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% varargout    cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject      handle to figure
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% Selecionando a Porta de Comunicação Arduino/MatLab
% --- Executes on selection change in SELEZIONACOM.
function SELEZIONACOM_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to SELEZIONACOM (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns SELEZIONACOM
contents as cell array

```

```

%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
SELEZIONACOM

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function SELEZIONACOM_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to SELEZIONACOM (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%% Evento Associado ao Botão "INICIAR"
%
% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
delete(instrfindall);
%limpa todos os instrumentos anteriormente abertos na serial
global COM; global time; global adress; global dia; global mes; global t;
global s; global ano; global horas; global minutos; global id_do_arquivo;
global b; global tensao_real; global corrente_real; global potencia; global
nome_do_arquivo;
global vmpp, global impp, global aux; global p;
COM = get(handles.SELEZIONACOM,'value');
Lê o número da porta COM selecionada
if(COM == 2)
    s = serial('COM1','BaudRate',57600);
elseif(COM == 3)
    s = serial('COM2','BaudRate',57600);
elseif(COM == 4)
    s = serial('COM3','BaudRate',57600);
elseif(COM == 5)
    s = serial('COM4','BaudRate',57600);
elseif(COM == 6)
    s = serial('COM5','BaudRate',57600);
elseif(COM == 7)
    s = serial('COM6','BaudRate',57600);
elseif(COM == 8)
    s = serial('COM7','BaudRate',57600);
elseif(COM == 9)
    s = serial('COM8','BaudRate',57600);
elseif(COM == 10)
    s = serial('COM9','BaudRate',57600);
elseif(COM == 11)
    s = serial('COM10','BaudRate',57600);
elseif(COM == 12)
    s = serial('COM11','BaudRate',57600);
elseif(COM == 13)

```

```

        s = serial('COM12','BaudRate',57600);
elseif(COM == 14)
    s = serial('COM13','BaudRate',57600);
elseif(COM == 15)
    s = serial('COM14','BaudRate',57600);
elseif(COM == 16)
    s = serial('COM15','BaudRate',57600);
end
errorocurred = false;           % Ocorrência de Erro recebe valor inicial
com Falso
try fopen(s);                   % Abre a porta serial.
catch aException                % Caso Ocorra um Erro.
    errorocurred = true;        % Ocorrência de Erro recebe valor
Verdadeiro
end
if errorocurred
    set(findobj(gcf,'Tag','feedback_comunicacao'),'string','FALHA NA
COMUNICAÇÃO!!!')
    handles.feedback_comunicacao.ForegroundColor = 'Red';
    handles.feedback_comunicacao.BackgroundColor = 'Yellow';
    pause(2);
    stop;
else
    set(findobj(gcf,'Tag','feedback_comunicacao'),'string','COMUNICAÇÃO
INICIALIZADA!!!')
    handles.feedback_comunicacao.ForegroundColor = 'Blue';
    handles.feedback_comunicacao.BackgroundColor = 'Green';
    pause(2);
end
pause(3);                       % Aguarda 3s para escrever na porta COM.
fprintf(s,'%s','1'); % Escreve na porta, comandando assim o Arduino.
time = clock;
adress = 'C:\Users\Luiz Carlos\Desktop\Tcc - Word\Comunicação Serial em
Linguagem Gráfica\dados';
dia = num2str(time(3));
mes = num2str(time(2));
ano = num2str(time(1));
horas = num2str(time(4));
minutos = num2str(time(5));
nome_do_arquivo = strcat(adress,dia,'-',mes,'-', ano,'-',horas,'-
',minutos,'.txt');
id_do_arquivo = fopen(nome_do_arquivo,'wt'); % wt=write, refere-se à ação que
se deseja fazer
t=1;
disp('Running');
pause(10);                      % Aguarda 10s para iniciar a leitura da porta serial
while(t <= 400)                 % Executa 400 ciclos - se você não consegue ver o símbolo,
isto é sinal de "menos de"
    erroleitura = false;
    try b(t,:) = str2num(fscanf(s));
    catch aException
        erroleitura = true;
        set(findobj(gcf,'Tag','feedback_comunicacao'),'string','Erro na
Leitura "COM INVÁLIDA" ')
        handles.feedback_comunicacao.ForegroundColor = 'Red';
        handles.feedback_comunicacao.BackgroundColor = 'Yellow';
        stop;
    end
    set(findobj(gcf,'Tag','feedback_comunicacao'),'string','CARACTERIZAÇÃO
CONCLUÍDA!! ')

```

```

handles.feedback_comunicacao.ForegroundColor = 'Black';
handles.feedback_comunicacao.BackgroundColor = 'Yellow';
tensao_real = b(:,2);
corrente_real = b(:,4);
potencia = tensao_real.*corrente_real;
t = t+1;
end
voc = max(tensao_real); % Tensão de Circuito aberto
isc = max(corrente_real); % Corrente de Curto Circuito
pmax = max(potencia); % Potência Máxima
p = 1;
aux = 0;
while(p <= 400)
    if(potencia(p)==pmax)
        aux = p; % Guarda a posição da Potência Máxima
    end
    p = p + 1;
end
vmpp = tensao_real(aux); % Tensão de Máxima Potência
impp = corrente_real(aux); % Corrente de Máxima Potência
ff = (impp*vmpp)/(isc*voc); % Fator de Forma;
fclose(s); % Fecha a porta serial.
axes(handles.axes1);
plot(tensao_real,corrente_real);
grid on;
title('Grafico I-V Corrente x Tensão');
xlabel(' Tensão [V] ');
ylabel(' Corrente [A] ');
axes(handles.axes2);
plot(tensao_real,potencia,'r');
grid on;
title('Grafico P-V Potência x Tensão');
xlabel(' Tensão [V] ');
ylabel(' Potência [W] ');
set(findobj(gcf,'Tag','voc'),'string',num2str(voc))
set(findobj(gcf,'Tag','isc'),'string',num2str(isc))
set(findobj(gcf,'Tag','pmax'),'string',num2str(pmax))
set(findobj(gcf,'Tag','vmpp'),'string',num2str(vmpp))
set(findobj(gcf,'Tag','impp'),'string',num2str(impp))
set(findobj(gcf,'Tag','ff'),'string',num2str(ff))

%clear all;
% Feedback para a comunicação
function feedback_comunicacao_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to feedback_comunicacao (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of feedback_comunicacao as
text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
feedback_comunicacao as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function feedback_comunicacao_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to feedback_comunicacao (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%% Evento Associado ao botão "EXTRAIR DADOS"
%
% --- Executes on button press in Extrair_dados.
function Extrair_dados_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to Extrair_dados (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
global b; global id_do_arquivo;
n = 1;
C = num2str(b);
while(n <= 400)
    fprintf(id_do_arquivo,'%s \n',C(n,:));
    n = n + 1;
end
fclose(id_do_arquivo);

function vmpp_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to vmpp (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of vmpp as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of vmpp as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function vmpp_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to vmpp (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function impv_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to impv (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of impv as text

```

```

%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of impp as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function impp_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to impp (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function pmax_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pmax (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of pmax as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of pmax as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function pmax_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pmax (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function ff_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ff (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of ff as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of ff as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ff_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ff (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```

```

% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function voc_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to voc (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of voc as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of voc as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function voc_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to voc (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function isc_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to isc (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of isc as text
%      str2double(get(hObject,'String')) returns contents of isc as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function isc_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to isc (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%      See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%% Evento Associado ao botão "LIMPAR DADOS"
% --- Executes on button press in limpar_dados.
function limpar_dados_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject      handle to limpar_dados (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
handles.output = hObject;
axes(handles.axes1)
cla reset;
axes(handles.axes2)
cla reset;
axes(handles.axes3)
imshow('C:\Users\Luiz_Carlos\Desktop\Tcc - Word\Comunicação Serial em
Linguagem Gráfica\IFG.jpg');
handles.voc.String = ' ';
handles.isc.String = ' ';
handles.vmpp.String = ' ';
handles.impp.String = ' ';
handles.pmax.String = ' ';
handles.ff.String = ' ';
handles.SELEZIONACOM.Value = 1;
handles.feedback_comunicacao.String = 'Aguardando Comunicação... ';
handles.feedback_comunicacao.ForegroundColor = 'Blue';
handles.feedback_comunicacao.BackgroundColor = 'White';
% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton5 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
Graficos_Dados_Salvos

```

O botão "Caracterizações Salvas" abre uma nova janela com as mesmas características da anterior, porém essa janela possui a opção de selecionar um arquivo salvo no mesmo diretório do programa raiz. A Figura 74, abaixo, mostra a janela criada.

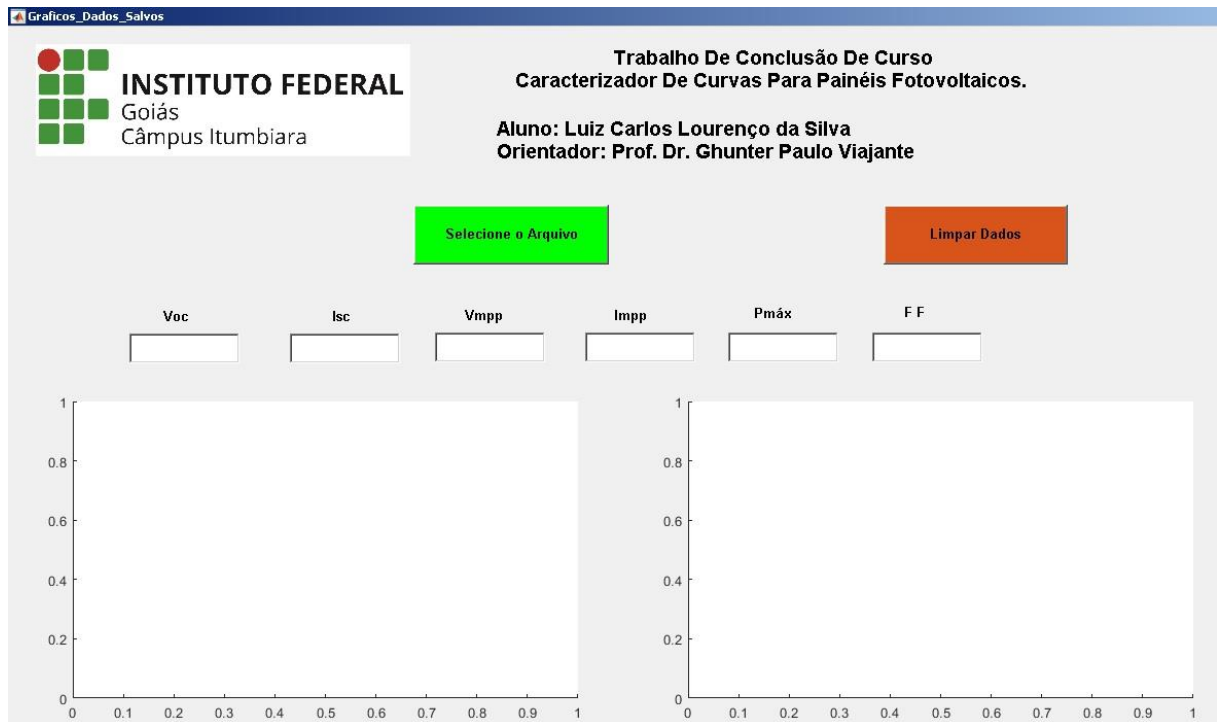


Figura 74 – Janela que é aberta ao clicar no botão “Caracterizações Salvas”. Fonte [Autor].

Essa janela deve ser programada de maneira similar à janela principal, com a programação orientada a eventos. Segue abaixo o algoritmo desenvolvido:

```
function varargout = Graficos_Dados_Salvos(varargin)
% Graficos_Dados_Salvos MATLAB code for Graficos_Dados_Salvos.fig
%   Graficos_Dados_Salvos, by itself, creates a new
%   Graficos_Dados_Salvos or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = Graficos_Dados_Salvos returns the handle to a new
%   Graficos_Dados_Salvos or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   Graficos_Dados_Salvos('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...)
%   calls the local
%   function named CALLBACK in Graficos_Dados_Salvos.M with the given
%   input arguments.
%
%   Graficos_Dados_Salvos('Property','Value',...) creates a new
%   Graficos_Dados_Salvos or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
%   are
%   applied to the GUI before Graficos_Dados_Salvos_OpeningFcn gets
%   called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property
%   application
%   stop. All inputs are passed to Graficos_Dados_Salvos_OpeningFcn
%   via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only
%   one
```

```

%      instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help Graficos_Dados_Salvos

% Last Modified by GUIDE v2.5 02-Apr-2019 13:20:58

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Graficos_Dados_Salvos_OpeningFcn,
                  ...
                  'gui_OutputFcn',  @Graficos_Dados_Salvos_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Graficos_Dados_Salvos is made visible.
function Graficos_Dados_Salvos_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject      handle to figure
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin     command line arguments to Graficos_Dados_Salvos (see
VARARGIN)

% Choose default command line output for Graficos_Dados_Salvos
%%
% Iniciando a Interface Gráfica
%%
handles.output = hObject;
clc
axes(handles.axes1)
cla reset;
axes(handles.axes2)
cla reset;
axes(handles.axes3)
imshow('C:\Users\Luiz Carlos\Desktop\Tcc - Word\Comunicação Serial em
Linguagem Gráfica\IFG.jpg');
handles.voc.String = ' ';
handles.isc.String = ' ';
handles.vmpp.String = ' ';
handles.impp.String = ' ';
handles.pmax.String = ' ';
handles.ff.String = ' ';

```

```

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Graficos_Dados_Salvos wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Graficos_Dados_Salvos_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% varargout    cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject      handle to figure
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function vmpp_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to vmpp (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of vmpp as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of vmpp as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function vmpp_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to vmpp (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function impp_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to impp (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of impp as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of impp as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function impp_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to impp (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function pmax_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pmax (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of pmax as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of pmax as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function pmax_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pmax (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function ff_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ff (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of ff as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of ff as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ff_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ff (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),

```

```

get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function voc_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to voc (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of voc as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of voc as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function voc_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to voc (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function isc_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to isc (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of isc as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of isc as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function isc_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to isc (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%% Evento Associado ao botão "LIMPAR DADOS"
% --- Executes on button press in limpar_dados.
function limpar_dados_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to limpar_dados (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
handles.output = hObject;
axes(handles.axes1)
cla reset;
axes(handles.axes2)
cla reset;
axes(handles.axes3)
imshow('C:\Users\Luiz Carlos\Desktop\Tcc - Word\Comunicação Serial em
Linguagem Gráfica\IFG.jpg');
handles.voc.String = ' ';
handles.isc.String = ' ';
handles.vmpp.String = ' ';
handles.impp.String = ' ';
handles.pmax.String = ' ';
handles.ff.String = ' ';

% --- Executes on button press in Selecionar_Arquivo.
function Selecionar_Arquivo_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Selecionar_Arquivo (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

global b; global tensao_real; global corrente_real; global potencia;
global nome_do_arquivo;
global vmpp, global impp, global aux; global p;
[file, path] = uigetfile('*.txt');
b = importdata(file);
tensao_real = b(:,2);
corrente_real = b(:,4);
potencia = tensao_real.*corrente_real;
voc = max(tensao_real); % Tensão de Circuito aberto
isc = max(corrente_real); % Corrente de Curto Circuito
pmax = max(potencia); % Potência Máxima
p = 1;
aux = 0;
while(p <= 400)
    if(potencia(p)==pmax)
        aux = p; % Guarda a posição da Potência Máxima
    end
    p = p + 1;
end
vmpp = tensao_real(aux); % Tensão de Máxima Potência
impp = corrente_real(aux); % Corrente de Máxima Potência
ff = (impp*vmpp)/(isc*voc); % Fator de Forma;
axes(handles.axes1);
plot(tensao_real,corrente_real,'linewidth',1.2);
grid on;
title('Gráfico I-V Corrente x Tensão');
xlabel(' Tensão [V] ');
hold on;
ylabel(' Corrente [A] ');
plot(vmpp,impp,'ko','linewidth',1.2);
plot(vmpp,0:impp,'k--','linewidth',1.2);
imppvet = [0:0.1:impp];
vmppvet = ones(length(imppvet),1)*vmpp;
plot(vmppvet,imppvet,'k--','linewidth',1.2);
vmppvet = [0:0.1:vmpp];
imppvet = ones(length(vmppvet),1)*impp;
plot(vmppvet,imppvet,'k--','linewidth',1.2);

```

```

axis([0 40 0 10]);
axes(handles.axes2);
plot(tensao_real,potencia,'r','linewidth',1.2);
grid on;
title('Gráfico P-V Potência x Tensão');
xlabel(' Tensão [V] ');
ylabel(' Potência [W] ');
hold on;
plot(vmpp,pmax,'ko','linewidth',1.2);
pmaxvet = [0:0.1:pmax];
vmppvet = ones(length(pmaxvet),1)*vmpp;
plot(vmppvet,pmaxvet,'k--','linewidth',1.2);
vmppvet = [0:0.1:vmpp];
pmaxvet = ones(length(vmppvet),1)*pmax;
plot(vmppvet,pmaxvet,'k--','linewidth',1.2);
axis([0 40 0 250]);
set(findobj(gcf,'Tag','voc'),'string',num2str(voc))
set(findobj(gcf,'Tag','isc'),'string',num2str(isc))
set(findobj(gcf,'Tag','pmax'),'string',num2str(pmax))
set(findobj(gcf,'Tag','vmpp'),'string',num2str(vmpp))
set(findobj(gcf,'Tag','impp'),'string',num2str(impp))
set(findobj(gcf,'Tag','ff'),'string',num2str(ff))

```