

Natália Nogueira Monteiro

**Protótipo de dispositivo de medição de tensão
e corrente contínuas, aplicado na detecção de
Degradação Induzida por Potencial em módulos
fotovoltaicos em operação**

Campos dos Goytacazes

2021

Natália Nogueira Monteiro

Protótipo de dispositivo de medição de tensão e corrente contínuas, aplicado na detecção de Degradação Induzida por Potencial em módulos fotovoltaicos em operação

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão do Instituto Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão. Área do Programa: Sistemas para Engenharia. Linha de Pesquisa: Sistemas Fotovoltaicos.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense – IFF
Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão
Programa de Pós-Graduação

Orientador: Prof. D.Sc. Rodrigo Martins Fernandes

Campos dos Goytacazes

2021

Biblioteca Anton Dakitsch
CIP - Catalogação na Publicação

M775p Monteiro, Natália Nogueira
Protótipo de dispositivo de medição de tensão e corrente contínuas, aplicado na detecção de Degradação Induzida por Potencial em módulos fotovoltaicos em operação. / Natália Nogueira Monteiro - 2021.
100 f.: il. color.

Orientador: Rodrigo Martins Fernandes

Dissertação (mestrado) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Campus Campos Centro, Curso de Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão, Campos dos Goytacazes, RJ, 2021.
Referências: f. 77 a 81.

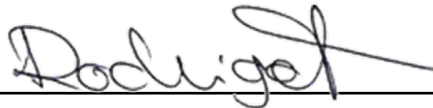
1. célula solar. 2. degradação. 3. efeito PID. I. Fernandes, Rodrigo Martins, orient. II. Título.

Natália Nogueira Monteiro

Protótipo de dispositivo de medição de tensão e corrente contínuas, aplicado na detecção de Degradação Induzida por Potencial em módulos fotovoltaicos em operação

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão do Instituto Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão. Área do Programa: Sistemas para Engenharia. Linha de Pesquisa: Sistemas Fotovoltaicos.

Campos dos Goytacazes, 29 de Novembro de 2021:



**Prof. D.Sc. Rodrigo Martins
Fernandes**

Orientador

Instituto Federal Fluminense – IFF



Prof. D.Sc. Rogério Atem de Carvalho

Membro Interno

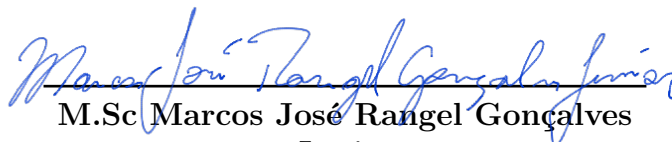
Instituto Federal Fluminense – IFF



Prof. D.Sc. William da Silva Vianna

Membro Externo

Instituto Federal Fluminense – IFF



**M.Sc. Marcos José Rangel Gonçalves
Junior**

Membro Externo

ENELTEC

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me permitiu ter essa oportunidade, me guiando em toda minha trajetória, me dando força e coragem para seguir meu caminho, ainda que fossem muitos os motivos para esmorecer.

Aos meu pais, Inês e Hélio, por serem minhas maiores inspirações e exemplos, agradeço por todo amor que sempre me foi dado, por todas as batalhas enfrentadas para que me permitisse chegar até aqui, todo apoio e incentivo durante essa jornada. Todas as palavras de ânimo, abraços e cuidados.

A meu irmão e minha cunhada, Lucas e Thamires, por me presentear com a maior dose de amor e incentivo que poderia existir: a chegada do meu sobrinho Miguel. Miguel, sua tia te ama!

A meu namorado, Lucas Martins Ramos, por estar ao meu lado nos melhores e nos piores momentos, por me encorajar, me ajudar, me incentivar e cuidar tão bem de mim. Com você a vida se torna mais leve!

Aos colegas de turma que trilharam este caminho junto comigo, em especial a Ricardo Tavares, meu grande parceiro de trabalhos, agradeço a todos vocês por todos os momentos vividos, abraços, risadas, estudos e momentos de desespero. Sem vocês tudo seria mais difícil!

Aos colegas da Eneltec e do Polo de Inovação do IFF, principalmente o Marcos, o Hiago e a Jéssica, que me deram todo suporte em todos os momentos que necessitei. Aprendi muito com vocês!

Aos meus professores, em especial a Leonardo Tavares, Henrique da Hora, Rogério Atem e William Viana: obrigada pelo tanto que acrescentaram e me ensinaram ao longo de toda minha jornada, vocês são minhas inspirações!

Agradecimento em especial ao meu orientador D.Sc. Rodrigo Martins Fernandes, por todo aprendizado durante a orientação, paciência e confiança.

Ao Instituto Federal Fluminense, por ser minha segunda casa.

Por fim, a todos aqueles que me ajudaram, de maneira direta ou indireta, recebam o meu muito obrigada!

“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.” (Henry Ford)

RESUMO

O constante aumento populacional global demanda uma quantidade de energia cada vez maior. Nesse sentido, a energia solar é uma das principais alternativas limpas para aumentar a matriz energética mundial, devido a diversas vantagens, como: disponibilidade, acessibilidade, confiabilidade, baixo impacto ambiental e alta vida. Os níveis de eficiência das placas solares são definidos, principalmente, pelos materiais utilizados em suas construções, e podem sofrer interferência devido a diversos efeitos de degradação naturais e temporais, além da degradação causada por correntes de fuga provenientes do efeito de polarização, definida como Degradação Induzida por Potencial (PID), ou efeito PID. O efeito PID ocorre quando há corrente de fuga para a terra através de fissuras ou falhas no material encapsulante e no vidro dos módulos, reduzindo a eficiência e o desempenho das placas. Porém, a degradação por este efeito pode ser reversível se detectada e solucionada a tempo, e os módulos regenerados necessitam de uma supervisão periódica para garantir seu nível de desempenho, sendo interessante a utilização de um sistema de monitoramento remoto devido à localização nem sempre fácil das placas. Nos sistemas existentes no mercado, normalmente, mede-se a tensão do barramento completo e a corrente de cada módulo, e para fins de detecção do efeito PID, é necessário realizar a medição de tensão em cada módulo e a corrente do barramento completo. Assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo de dispositivo de monitoramento de tensão e corrente contínuas, através de dispositivos IoT (Internet of Things), para auxiliar na detecção do efeito PID, e para supervisão de módulos que já sofreram esse efeito. Para compor este dispositivo, serão necessários dois tipos de módulos: um medirá tensão e corrente em conjunto, e o outro medirá apenas tensão. Na ocorrência do PID, é percebida uma queda no valor de tensão no módulo, que resulta na redução de seu desempenho. O dispositivo será composto por materiais específicos para exposição em campo aberto, e se comunicará com um microcontrolador via WiFi, para posterior análise de dados. Os dados obtidos através desse dispositivo serão indicativos para a ocorrência de degradação por efeito PID, essenciais para que se torne possível a reversão dessa degradação, ou pelo menos a minimização de seus efeitos, regenerando os módulos atingidos e recuperando seu nível de desempenho.

Palavras-chave: célula solar, degradação, efeito PID.

ABSTRACT

The increasingly number of people around the globe requires a bigger amount of energy each day. For this reason, the solar energy is one of the most important alternative to feed the world energy matrix, due to its availability, affordability, reliability, high life and low environmental impact, once it's a clean energy source. The levels of efficiency of solar panels are defined by the materials used in their constructions, and may be interfered by natural degradation effects, and also degradation caused by leakage currents from the effect of polarization, called Potential Induced Degradation (PID), or PID effect. The PID effect occurs when there is leakage current to earth through cracks or faults in the encapsulating material and in the glass of the modules, reducing the efficiency and performance of the panels. However, it's possible to revert the effects of PID if it's detected in time. The regenerated modules need supervision periodically to make sure their performance are satisfactory again, being interesting to use a remote monitoring system once it's not always easy to get to where the modules are. There are some systems in the market but, normally, they measure the voltage of the complete string and the current of each module, and for detecting the PID effect, it's necessary just the opposite: the measurement of voltage in each module and the current of the complete string. Thus, this study is focused on developing a prototype of a voltage and direct current monitoring device, using IoT (Internet of Things) concepts, in order to help the detection of the PID effect, and to supervise the modules already affected by this. For this prototype, two types of modules will be necessary: one of them will measure voltage and current together, the other one will only measure voltage. In the occurrence of PID effect, voltage in the photovoltaic module decreases, reducing performance. The device will be constructed with specific materials to be exposed to weather conditions, and data will be sent via WiFi to a microcontroller, to be analysed by specialists. Data aquisition from this system will be an evidence for the occurrence of degradation by PID effect, facilitating its reversal or, at least, minimizing its effects, regenerating modules and their performance.

Keywords: solar cell, degradation, PID effect

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Painel afetado pela degradação por efeito PID no lado com potencial negativo	25
Figura 2 – Imagens de eletroluminescência antes e depois de um painel passar por testes de PID	26
Figura 3 – Modelo V	30
Figura 4 – Diagrama representativo do dispositivo inserido em uma <i>string</i> fotovoltaica	32
Figura 5 – Diagrama da arquitetura do protótipo do dispositivo	35
Figura 6 – Esquema do protótipo no Kicad	37
Figura 7 – Conversor A/D - Modelo ADS1115	38
Figura 8 – Resistores de 6,19k e 200k	39
Figura 9 – Diagrama de Blocos do ADS1115	39
Figura 10 – Sensor de corrente de efeito hall - Modelo ACS712	40
Figura 11 – Dispositivo IoT	42
Figura 12 – Fonte de Alimentação - Mini Fonte HLK-PM01	43
Figura 13 – Conectores no padrão MC4	44
Figura 14 – Cabos solares	44
Figura 15 – Esquemático da PCB no Kicad	46
Figura 16 – Gerber da PCB	46
Figura 17 – Prototipadora ProtoMat S64 LPKF	47
Figura 18 – PCB com componentes soldados	47
Figura 19 – Segunda versão da PCB fabricada posteriormente	48
Figura 20 – Interface de configuração	49
Figura 21 – Multímetro Fluke 179	50
Figura 22 – Fonte de Bancada BK Precision	50
Figura 23 – Teste do ADS na protoboard	51
Figura 24 – Teste do Divisor Resistivo na Protoboard	52
Figura 25 – Teste Unitário do Divisor Resistivo na Protoboard	53
Figura 26 – Configuração da fonte de bancada (na própria tela) para teste do sensor de corrente	54
Figura 27 – Linearização do sensor de corrente	55
Figura 28 – Teste da fonte de alimentação Hi-Link	57
Figura 29 – Terminal de programação - Teste do Módulo de Tensão	58
Figura 30 – Teste do Módulo de Tensão	59
Figura 31 – Teste do sensor de corrente	60

Figura 32 – Valores em tensão do sensor de corrente	61
Figura 33 – Montagem para simulação do dispositivo na protoboard	62
Figura 34 – Primeiro teste de sistema	62
Figura 35 – Mini placas solares utilizadas no teste	63
Figura 36 – Conexão entre as mini placas solares e o dispositivo	64
Figura 37 – Novos resistores dimensionados	65
Figura 38 – PCB em caixa de montagem	66
Figura 39 – Componentes da PCB em caixa de montagem	66
Figura 40 – Esquema da ligação física do dispositivo em uma <i>string</i> fotovoltaica	67
Figura 41 – Módulos fotovoltaicos no Polo de Inovação	68
Figura 42 – Especificação do módulo fotovoltaico	69
Figura 43 – Parte inferior do módulo fotovoltaico	69
Figura 44 – Diagrama de montagem da caixa no módulo	70
Figura 45 – Caixa conectada ao módulo	71
Figura 46 – Sistema pronto para teste	71
Figura 47 – Tela de inicialização do MQTT Explorer	72
Figura 48 – Valor do teste de aceitação com circuito aberto	73
Figura 49 – Segundo teste de aceitação	74
Figura 50 – Valor do teste de aceitação com sombreamento	75
Figura 51 – Terceiro teste de aceitação	76
Figura 52 – Fontes de Energias Renováveis	84
Figura 53 – Oferta Interna de Energia - Brasil	85
Figura 54 – Índice de Potencial Fotovoltaico do Brasil	86
Figura 55 – Nomenclaturas de Placas Fotovoltaicas	87
Figura 56 – Representação de um corte do Módulo Fotovoltaico	90
Figura 57 – Materias utilizados nos componentes do Módulo Fotovoltaico	91
Figura 58 – Circuito equivalente de uma Célula Fotovoltaica	92
Figura 59 – Curva I-V de um Painel Fotovoltaico afetado pelo PID	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Termos de busca em português	19
Quadro 2 – Termos de busca em inglês	19
Quadro 3 – Descrição das etapas do Modelo V	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação dos valores de tensão no ACS712	41
Tabela 2 – Tabela de Preços dos Componentes utilizados no Protótipo	45
Tabela 3 – Teste Unitário do ADS1115 (protoboard)	51
Tabela 4 – Teste Unitário do Divisor Resistivo	52
Tabela 5 – Segundo Teste Unitário do Divisor Resistivo	53
Tabela 6 – Teste do Sensor de Corrente	55
Tabela 7 – Teste do Módulo de Tensão	58
Tabela 8 – Teste do Módulo de Corrente	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Corrente Alternada
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
CC	Corrente Contínua
DC	<i>Direct Current</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EVA	Acetato de Etil Vinila
FF	Fator de Forma
FV	Fotovoltaico
GW	Gigawatt
I2S	Integração e Inteligência para Sustentabilidade
IFF	Instituto Federal Fluminense
IMPP	Corrente no ponto de potência máxima
IoT	<i>Internet of Things</i>
Isc	Corrente de curto-circuito
kWh	Quilowatt-hora
kWp	Quilowatt-pico
LID	<i>Light Induced Degradation</i>
MPP	Ponto de potência máxima
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker</i>
PICG	Polo de Inovação Campos dos Goytacazes
PID	<i>Potential Induced Degradation</i> ou Degradação Induzida por Potencial
VMPP	Tensão no ponto de potência máxima
Voc	Tensão de circuito aberto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
1.2	Justificativa	17
1.3	Estrutura do Trabalho	18
2	ESTADO DA ARTE	19
2.1	Estratégia de Busca	19
2.2	Trabalhos mais relevantes	20
3	BUSCA PATENTÁRIA	22
3.1	Estratégia de Busca	22
3.2	Revisão Patentária	22
3.2.1	Patente nº WO2017085174-A1	22
3.2.2	Patente nº KR2076978-B1	23
3.2.3	Patente nº KR2017041304-A	23
3.2.4	Patente nº CN104201981-A	23
4	REFERENCIAL TEÓRICO	24
4.1	Efeito PID	24
4.1.1	Diagnóstico	25
4.1.2	Regeneração	27
5	METODOLOGIA	29
5.1	Modelo V	29
6	DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	32
6.1	Conceito de Operações	32
6.2	Especificação do Sistema (Requisitos)	33
6.2.1	Módulo de Medição de Tensão	33
6.2.2	Módulo de Medição de Corrente	34
6.2.3	Comunicação	34
6.2.4	Fonte de Alimentação	34
6.2.5	Estrutura Física	35
6.3	Design de Alto Nível	35
6.3.1	Pré-definição do projeto da Placa de Circuito Impresso	36

6.4	Projeto Detalhado	37
6.4.1	Preço de Custo do Protótipo	44
6.5	Desenvolvimento de Software e Hardware	45
6.5.1	Desenvolvimento e Montagem da Placa de Circuito Impresso com Componentes	45
6.5.2	Códigos	48
6.5.3	Interface de Configuração	48
6.6	Testes Unitários	49
6.6.1	Conversor A/D - ADS1115	51
6.6.2	Medição de Tensão - Divisor Resistivo	52
6.6.3	Medição de Corrente - ACS712	54
6.6.4	Fonte de Alimentação - Hi-Link	56
6.6.5	Testes do Módulo de Comunicação/Controle	56
6.7	Teste do Subsistema	56
6.7.1	Módulo de Comunicação e Controle	56
6.7.2	Fonte de Alimentação	57
6.7.3	Módulo de Tensão	57
6.7.4	Módulo de Corrente	59
6.8	Teste do Sistema	61
6.9	Teste de Aceitação	65
7	CONCLUSÕES	77
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICES	83
	APÊNDICE A – MATERIAL DE APOIO	84
A.1	Energias Renováveis	84
A.1.1	Energia Solar	85
A.2	Placas Solares	87
A.2.1	Efeito Fotovoltaico	88
A.2.2	Células Fotovoltaicas	88
A.2.2.1	Silício Cristalino (c- Si)	89
A.2.2.2	Filmes Finos	89
A.2.3	Componentes e Estrutura	90
A.2.4	Características Elétricas	91
A.3	Degradação das Placas Solares	94

	ANEXOS	96
	ANEXO A – CÓDIGOS DE PROGRAMAÇÃO	97
A.1	Código <i>Main</i>	97
A.2	Código Principal	98

1 INTRODUÇÃO

No cenário mundial, a produção de energia solar tem obtido altos índices de desenvolvimento tecnológico, tendo um aumento de 24% na matriz elétrica mundial em 2018, se destacando devido às suas diversas vantagens como disponibilidade, acessibilidade, confiabilidade, baixo impacto ambiental e alta vida . Além disso, um diferencial neste tipo de geração de energia está no fato de que pode esta ser instalada em centros urbanos, pois não há a emissão de gases poluentes ([ASSUNCAO, 2014](#); [PINHO; GALDINO, 2014](#)). Por outro lado, é necessário um alto investimento inicial para a aquisição e funcionamento das placas solares, que também requerem uma manutenção contínua e periódica visando garantir seus níveis de eficiência ([BORGES, 2013](#); [LUNA, 2016](#)).

Os níveis de eficiência das placas solares são obtidos através da escolha dos materiais utilizados na sua construção, e sofrem interferência devido a diversos efeitos de degradação naturais, temporais, e também causados por correntes de fuga (efeito da polarização), conhecida como Degradação Induzida por Potencial ou, em inglês, *Potential-Induced Degradation* (PID) ([FIGUEIREDO; ZILLES, 2015](#); [LEITE, 2012](#)) .

O efeito PID ocorre quando há corrente de fuga para a terra através de fissuras ou falhas no material encapsulante e no vidro dos módulos, podendo ser influenciado por diversos fatores ambientais, como umidade relativa e temperatura ([FIGUEIREDO; ZILLES, 2015](#)). Este tipo de degradação influencia diretamente na tensão dos módulos afetados e, conseqüentemente, na durabilidade e eficiência dos módulos, provocando reduções drásticas de desempenho, que podem atingir até 30%. Porém, a degradação por efeito PID pode ser reversível se solucionada a tempo ([FILHO; FIGUEIREDO, 2017](#); [PINGEL et al., 2010](#)). Deve-se ressaltar que a degradação por efeito PID é mais severa quanto maior for a tensão no inversor e, logo, quanto maior for o porte dos módulos fotovoltaicos (FV), enquanto microgeradores não são afetados de maneira relevante.

Por isso, é importante que os indícios da ocorrência do efeito PID nas placas sejam detectados o mais rápido possível, para que seja possível obter sua reversão. Além disso, uma vez que os módulos afetados passam pelo processo de regeneração, é necessário uma supervisão periódica para garantir que os mesmos tenham recuperado seu nível de desempenho e se mantenham operando eficientemente. Uma das formas de se atingir tais objetivos é monitorando o nível de tensão de cada módulo, porém, o acesso à essas placas nem sempre é fácil, tornando-se interessante a utilização de um sistema de monitoramento remoto.

Neste sentido, este trabalho propõe-se a desenvolver um protótipo de um dispositivo de monitoramento de tensão para sistemas fotovoltaicos de médio e grande porte, com

base nos conceitos de IoT (*Internet of Things*), em que os dados obtidos serão indicativos para a ocorrência de degradação por efeito PID, auxiliando também na supervisão de módulos fotovoltaicos que já sofreram degradação e perda de eficiência proveniente deste efeito, de modo que se torne possível sua reversão, ou pelo menos a minimização de seus efeitos, regenerando os módulos atingidos e recuperando seu nível de desempenho.

Além disso, alguns fabricantes fornecem aos módulos a denominação de "PID-free", ou seja, possuem mecanismos de proteção para serem livres dos efeitos de degradação por efeito PID. Assim, com os dados obtidos pelo sistema é possível que o usuário saiba quando acionar a garantia ao fabricante dos módulos, a partir do percentual de redução de energia ao longo do tempo, visto que a degradação por efeito PID provocará uma redução de eficiência acima do esperado e especificado pelo fabricante.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Projetar, desenvolver e testar um protótipo de um dispositivo de medição de tensão e corrente contínuas para ser utilizado num sistema de monitoramento remoto de módulos fotovoltaicos de médio e grande porte. Este sistema tem por finalidade auxiliar na detecção do efeito PID nos módulos e na supervisão de desempenho de módulos já afetados por esse efeito, sendo responsável pela medição da tensão e corrente e envio do sinal para uma base de dados para posterior análise.

O dispositivo tem como características: fixação na estrutura metálica dos módulos, em caixas próprias para estarem expostas ao tempo a partir do uso de materiais específicos para ligações elétricas solares; monitoramento dos valores de tensão e corrente contínuas; e envio dos dados para um servidor remoto.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) detalhar os requisitos do dispositivo;
- b) especificar sensores, microcontroladores e materiais do dispositivo;
- c) projetar e implementar o dispositivo de medição de tensão e corrente contínuas;
- d) realizar testes de bancada do dispositivo;
- e) realizar o teste do dispositivo no campo (ambiente real).

1.2 Justificativa

As ações voltadas para o meio-ambiente e a sustentabilidade impulsionam cada vez mais o desenvolvimento de projetos com soluções que promovam a sustentabilidade e autossuficiência em diversos setores, com a criação de ambientes inteligentes e interativos com o mundo físico utilizando os conceitos de cidades e *campus* inteligentes.

Um exemplo é o projeto I2S (Integração e Inteligência para Sustentabilidade) no Polo de Inovação de Campos dos Goytacazes (PICG), no Rio de Janeiro, que tem como objetivo tornar o próprio *campus* em um *campus* inteligente, e se encontra em andamento. Além disso, há um incentivo de toda rede dos Institutos Federais para a implantação de sistemas de placas solares, visando a autossuficiência energética de seus *campus*.

Nesse sentido, o PICG, em parceria com a empresa israelense Vidgu, realiza testes em equipamentos (painéis solares) que sofrem degradação pelo PID. A Vidgu é uma empresa de pesquisa e desenvolvimento de alta tecnologia que produz soluções exclusivas para o efeito PID. Nessa parceria, foram realizados testes em um sistema localizado no IFF campus Cabo Frio que, após 3 anos em operação, apresentou uma queda no desempenho e na geração de energia.

O trabalho de [Camara, Miranda e Silva \(2019\)](#) identificou a ocorrência de efeitos de degradação pelo PID em alguns módulos desse sistema, e iniciou o processo de regeneração em laboratório para reduzir esses efeitos. Após a reversão, os módulos foram reinstalados no sistema e tornou-se necessário monitorar a durabilidade do efeito regenerativo aplicado, assim como realizar a inspeção nos demais módulos, de modo a evitar que estes também sofram redução de desempenho pelo efeito PID.

Os sistemas já existentes no mercado, normalmente, são dispositivos para serem fixados em quadros elétricos, e são projetados para medir a tensão do barramento completo (string fotovoltaico) e a corrente em cada módulo. Por outro lado, para fins de detecção e monitoramento do efeito PID, é necessário realizar a medição de tensão em cada módulo separadamente, enquanto a corrente pode ser do barramento completo, e esses sistemas devem ficar juntos ao módulo, fixados na estrutura metálica.

Embora essas medições de tensão possam ser realizadas periodicamente de forma pontual, é necessário que um operador faça a coleta no local onde os módulos estão instalados, e nem sempre esses módulos são de fácil acesso, dificultando todo o processo.

Assim, o dispositivo de monitoramento remoto proposto é idealizado justamente diante da necessidade de interromper cada um desses módulos para medição de tensão, e por se tratar de um sistema independente da intervenção humana no campo. Os dispositivos estarão abrigados em caixas próprias com materiais específicos para exposição ao tempo, atuando na detecção do efeito PID e minimizando seus efeitos de degradação.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi organizado da seguinte forma:

- a) **Capítulo 1** – Apresenta a introdução, contextualizando o tema, definindo os objetivos e justificativa da pesquisa realizada;
- b) **Capítulo 2** – Compreende a busca e seleção dos trabalhos mais importantes e correlacionados ao tema proposto, auxiliando na elaboração deste;
- c) **Capítulo 3** – Compreende a busca patentária, com uma breve revisão das patentes mais semelhantes ao que é proposto neste trabalho;
- d) **Capítulo 4** – Apresenta toda revisão bibliográfica realizada visando um melhor e mais específico entendimento deste trabalho;
- e) **Capítulo 5** – Descreve a metodologia utilizada para o desenvolvimento do protótipo;
- f) **Capítulo 6** – Trata do desenvolvimento do trabalho proposto, detalhando suas fases de construção, testes, integração, validação e respectivos resultados, de acordo com a metodologia apresentada;
- g) **Capítulo 7** – Aborda as conclusões obtidas através deste trabalho, verificando se os objetivos foram alcançados.

2 ESTADO DA ARTE

Este capítulo apresenta as estratégias de busca utilizadas para a pesquisa de trabalhos do mesmo tema ao proposto neste trabalho, e a seleção e revisão dos mais importantes e semelhantes a este, de modo a auxiliar no completo entendimento do trabalho proposto e na elaboração da dissertação.

2.1 Estratégia de Busca

A pesquisa foi realizada na base *Scopus*, no *Google Scholar*, e nos principais livros e periódicos da área, por meio de palavras-chave e seus respectivos tesouros, em inglês e português, que melhor representassem o tema proposto. Os termos de busca utilizados foram combinados de diferentes formas entre si para melhor aquisição de trabalhos de tema semelhante ao proposto, e estão apresentados no [Quadro 1](#) e no [Quadro 2](#).

Quadro 1 – Termos de busca em português

Conjunto	Termos
A	"sistemas fotovoltaicos"OU "sistema solar"OU fotovoltaico OU "energia solar"
B	paine* OU célula* OU módulo*
C	PID OU "efeito PID"OU "Degradação Induzida por Potencial"
D	regeneração OU recuperação
E	voltagem OU tensão
F	monitoramento OU supervisão OU detecção OU medição

Fonte – Autor.

Quadro 2 – Termos de busca em inglês

Conjunto	Termos
A	<i>"photo-voltaic"OR photovoltaic OR solar OR "solar power"OR PV OR "solar PV"</i>
B	<i>panel* OR cell* OR module*</i>
C	<i>PID OR "PID effect"OR "Potencial Induced Degradation"</i>
D	<i>recover* OR regenerat*</i>
E	<i>voltage* OR tension*</i>
F	<i>monitoring OR supervis* OR detect* OR measure*</i>

Fonte – Autor.

2.2 Trabalhos mais relevantes

Diversas pesquisas e experimentos foram desenvolvidos a fim de analisar o efeito PID em células fotovoltaicas ao longo dos anos. A partir dos resultados obtidos pelas pesquisas, foi feita a leitura dos resumos dos trabalhos, e os principais foram analisados de forma completa.

Trabalhos como os de [Cueto e Rummel \(2010\)](#), [Hacke et al. \(2011\)](#), [Hoffmann e Koehl \(2014\)](#) e [Pingel et al. \(2010\)](#) propuseram métodos de ensaio em laboratório para avaliar a propensão dos módulos FV ao efeito PID, assim como a suportabilidade de tensão das células e a influência de suas propriedades para a ocorrência do efeito.

[Pingel et al. \(2010\)](#) avaliaram a influência das propriedades das células do tipo P, analisando o sistema, o módulo e a célula separadamente. A nível de sistema, verificou que a diferença de potencial entre a célula e a estrutura aterrada é o principal fator na ocorrência do PID. A nível de painel, verificou que fatores como umidade e temperatura influenciam a ocorrência das correntes de fuga entre a célula e a terra, além de que as propriedades do material de encapsulamento influenciam na intensidade dessas correntes. Por fim, a nível celular, constatou que a qualidade do material, principalmente da camada antirreflexiva, é de grande importância para o efeito PID.

[Swanson et al. \(2005\)](#) analisaram a influência da tensão negativa em uma célula do tipo P, e verificou a diminuição da resistência paralela pelo efeito da polarização, além de constatar que os módulos afetados estavam sempre localizados na extremidade positiva do sistema (no caso das células do tipo P). Enquanto isso, [Filho e Figueiredo \(2017\)](#) verificaram que as células próximas ao centro do módulo são menos suscetíveis ao PID, pois há uma distância maior entre a célula e a moldura. [Daoren et al. \(2018\)](#) corroboraram, em seus experimentos, que o PID ocorre com mais facilidade nas células próximas às bordas dos módulos.

[Hoffmann e Koehl \(2014\)](#), [Hylsky, Strachala e Van k \(2016\)](#) e [Pingel et al. \(2010\)](#) verificaram que o efeito de fatores ambientais como umidade e temperatura influenciam na intensidade do PID, concluindo que as maiores correntes de fuga ocorrem nos momentos de maior umidade relativa. Isso ocorre pois a umidade cria uma fina película de água no vidro dos módulos, que aumenta sua condutividade em até 100%, se tornando o principal caminho para as correntes de fuga. Por isso, esses módulos são mais suscetíveis ao PID. Nesse sentido, a temperatura ambiente está diretamente relacionada ao aparecimento das correntes de fuga, pois influencia na umidade do módulo ([LEITE, 2012](#); [LUO et al., 2017](#)).

[Bauer et al. \(2012\)](#), [Berghold et al. \(2010\)](#), [Lausch et al. \(2014\)](#), [Naumann et al. \(2012\)](#) e [Naumann et al. \(2014\)](#) relataram o fluxo de íons de sódio Na^+ do vidro frontal para o interior da célula como causa principal para o efeito PID, corroborando os estudos de [Pingel et al. \(2010\)](#) de que esses íons promovem a diminuição da resistência paralelas nos

módulos, causando o efeito PID. Por outro lado, [Masuda, Hara e Jonai \(2016\)](#) verificaram, pela primeira vez, a difusão de sódio (Na) em módulos fotovoltaicos sem a ocorrência do PID, sugerindo que essa difusão não é condição suficiente para o efeito, mas sim uma das condições necessárias.

[Hylsky, Strachala e Van k \(2016\)](#) promoveram a regeneração de um módulo fotovoltaico em 8 passos: em 4 deles utilizou apenas a aplicação de uma tensão inversa de 600V, e nos outros 4 aplicou a tensão inversa de 600V e também promoveu um aquecimento de 80°. Neste trabalho, verificou-se que a aplicação da temperatura acelera o processo de regeneração das células.

[Lausch et al. \(2014\)](#) também utilizaram as técnicas de regeneração por aplicação de uma tensão com polaridade inversa e da exposição à uma alta temperatura, observando como resultado um aumento na resistência paralela suficiente para recuperar parâmetros de eficiência.

[Hylsky et al. \(2018\)](#) propuseram uma estrutura resistiva contra o efeito PID, sem reduzir a eficiência e parâmetros elétricos da célula.

[Martínez-Moreno et al. \(2013\)](#) apresentam uma metodologia de medidas pontuais de tensões de operação, a partir do uso de um voltímetro, para avaliar o nível de degradação dos módulos em uma central fotovoltaica em operação.

[Camara, Miranda e Silva \(2019\)](#) desenvolveram uma fonte de tensão para aplicar até 1000Vcc entre a moldura e a célula com o objetivo de reverter os efeitos do PID, promovendo a regeneração dos módulos afetados.

3 BUSCA PATENTÁRIA

Este capítulo tem por finalidade apresentar a busca por patentes de projetos semelhantes ao proposto que estejam patenteados, realizando uma breve revisão das mais relevantes ao tema deste.

3.1 Estratégia de Busca

A busca por patentes relacionadas ao trabalho proposto foi realizada na *Derwent Innovations Index*, da plataforma *Web Of Science*. A *string* de pesquisa utilizada foi $TS=((solar\ OR\ 'photo-voltaic'\ OR\ 'photovoltaic'\ OR\ 'solar\ power'\ OR\ 'PV'\ OR\ 'solar\ PV'))\ AND\ (panel^*\ OR\ cell^*\ OR\ module^*)\ AND\ ('PID'\ OR\ 'Potential\ Induced\ Degradation')\ AND\ (detect^*\ OR\ monitor^*\ OR\ measure\ OR\ supervisio^*)\ AND\ (voltage\ OR\ tension)\ AND\ (web\ OR\ monitor^*\ OR\ supervis^*\ OR\ online\ OR\ system^*\ OR\ cloud))$, retornando 38 resultados no total.

3.2 Revisão Patentária

As principais patentes selecionadas não disponibilizavam seu documento completo. Assim, apenas seus resumos serão apresentados.

3.2.1 Patente nº WO2017085174-A1

Os autores desenvolveram um método para detectar o efeito PID em módulos fotovoltaicos determinando valores do gerador de tensão e corrente (U_{mpp} e I_{mpp}) que caracterizam o processo de degradação. Primeiro é detectada a primeira corrente relacionada a primeira tensão de um gerador FV. Em seguida, o gerador passa a operar, adicionalmente, com uma tensão do segundo gerador, e a corrente em relação a essa segunda tensão também é detectada. A tensão no primeiro gerador (U_1) é escolhida de forma que a primeira potência ($P_1=U_1 \cdot I_1$) é pré-definida por $V_1=P_1/P_{mpp}$ e $V_1 < 1$. A segunda tensão no gerador (U_2) é escolhida de forma que a potencia $P_2=U_2 \cdot I_2$ é pré-definida por $V_2=P_2/P_1$ e $V_2 < 1$ para a primeira potência (P_1) do gerador. Assim, foi definido que a quantidade característica que caracteriza o progresso da degradação por efeito PID é determinada pelos valores de tensão e corrente do primeiro e segundo geradores.

3.2.2 Patente nº KR2076978-B1

Uma unidade de detecção mede a corrente e a resistência do resistor variável com um bypass na corrente para o outro módulo de células solares, conectadas em cada um dos módulos. A curva I-V é calculada pela corrente e tensão desta unidade de detecção, assim como a mudança na inclinação na curva, no ponto de inflexão, descascamento, rachaduras, entre outros. O sistema de monitoramento emite um alarme ao administrador diagnosticando o tipo de ponto quente, falha no diodo de bypass e PID. Assim, os custos de manutenção das placas são reduzidos pela melhoria na taxa de utilização e eficiência do sistema de geração de energia fotovoltaica, uma vez que o administrador pode corrigir rapidamente as falhas detectadas.

3.2.3 Patente nº KR2017041304-A

Um módulo de célula solar é selecionado e a saída de tensão é medida em um ambiente sem radiação solar. O módulo no qual a medição da tensão de saída não é emitida é diagnosticado como um módulo com degradação pelo fenômeno de PID. A partir desse sistema, a durabilidade dos sistemas fotovoltaicos podem ser aumentadas.

3.2.4 Patente nº CN104201981-A

A tensão de saída de cada canal de cada string é detectada, e esta tensão de saída é comparada com o primeiro de valor de tensão pré-definido no sistema. Assim, a ocorrência do fenômeno de PID é determinada quando o valor comparado é maior que o primeiro valor pré-determinado.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta um breve estudo teórico sobre o efeito PID, realizado para um melhor entendimento do trabalho proposto.

Para fins de manter o trabalho sucinto, entende-se que o leitor possui conhecimentos prévios acerca da teoria de energias renováveis e dos componentes de um sistema solar fotovoltaico. Se este não for o caso, no Apêndice A há um material de apoio.

4.1 Efeito PID

A Degradação Induzida pelo Potencial (PID – do inglês, *Potencial Induced Degradation*) em sistemas FV ocorre quando os componentes do sistema estão em diferentes potenciais elétricos, sendo um tipo de degradação ocasionado pelo efeito da polarização. Esse efeito é definido como a tensão que pode ser gerada pelos polos do gerador FV em operação em relação à estrutura que está aterrada. Em sistemas de alta potência, essa tensão aumenta proporcionalmente o campo elétrico gerado entre a célula e a moldura aterrada (FIGUEIREDO; ZILLES, 2015).

Os efeitos da polarização foram percebidos como fatores de degradação em sistemas fotovoltaicos pela primeira vez na década de 70, nos estudos de Hoffman e Ross (1978). Posteriormente, Swanson et al. (2005) descreveu o fenômeno do efeito da polarização em células fotovoltaicas, registrando o PID em módulos comerciais pela primeira vez. Porém, somente em 2010 este fenômeno foi denominado como Degradação Induzida pelo Potencial nos estudos de Berghold et al. (2010) e Cueto e Rummel (2010).

Conforme aponta Luo et al. (2017), o PID é um fenômeno recente e complexo, o que dificulta seu completo entendimento e, conseqüentemente, o progresso de soluções totalmente eficazes ou de tecnologias fotovoltaicas totalmente livres do PID. Apesar disso, já existem células e módulos com equipamentos de proteção ao PID, considerados “módulos PID-free”, e muitos laboratórios realizam testes para verificar a propensão de módulos ao PID (FILHO; FIGUEIREDO, 2017).

As causas e a intensidade desse efeito sofrem variações de acordo com as características construtivas do módulo (materiais encapsulantes ou tipo de base e dopagem do emissor nas células), e do sistema (tensão de operação em relação à terra ou aterramento) (LUO et al., 2017; FILHO; FIGUEIREDO, 2017). A nível celular, as células que possuem potencial positivo são afetadas por cargas negativas, e vice-versa (HACKE et al., 2011).

No caso das células do tipo P, o efeito PID pode ser descrito, basicamente, como

a polarização e movimento de íons de sódio (Na^+), que são provenientes da composição do vidro frontal da estrutura, através de outras partes da estrutura do módulo até a terra, caracterizando uma corrente de fuga (FIGUEIREDO; ZILLES, 2015; FILHO; FIGUEIREDO, 2017). Para que isso ocorra, a existência de um potencial negativo em relação à terra é determinante (Figura 1), de modo que quando o potencial passa de negativo para positivo, a degradação para de ocorrer (PINGEL et al., 2010).

Figura 1 – Pannel afetado pela degradação por efeito PID no lado com potencial negativo



Fonte: (PINGEL et al., 2010)

De forma mais detalhada, a diferença de potencial entre a célula FV e a moldura polariza e promove a migração dos íons Na^+ do vidro para a camada antirreflexiva da célula, que se acumulam nas falhas de encapsulamento. Esse acúmulo de íons faz com que a junção P-N perca suas propriedades afetando a resistência paralela das células, e geram um campo elétrico que repele os elétrons e é capaz de inverter as partes do emissor, formando uma espécie de túnel (FIGUEIREDO; ZILLES, 2015; FILHO; FIGUEIREDO, 2017). Assim, o emissor N^+ é invertido em uma camada P^+ , devido à corrente de túnel que é formada na junção P-N (BAUER et al., 2012).

Já em células do tipo N, quando são expostas a um alto potencial positivo, a corrente “vaza” da célula para a estrutura aterrada, acumulando cargas negativas na superfície do revestimento. Desta forma, as lacunas geradas pelo efeito fotovoltaico com carga positiva não são atraídas pela junção P-N da célula, mas sim pela superfície do revestimento que possui as cargas negativas acumuladas, onde ocorre a recombinação dos elétrons (SWANSON et al., 2005).

4.1.1 Diagnóstico

O efeito PID pode ser identificado de algumas formas, tanto a nível de módulo quanto de célula. As células afetadas apresentam algumas características específicas, como redução de desempenho, com valores de potência menores, e aumento de temperatura, que permitem seu diagnóstico de algumas formas diferentes.

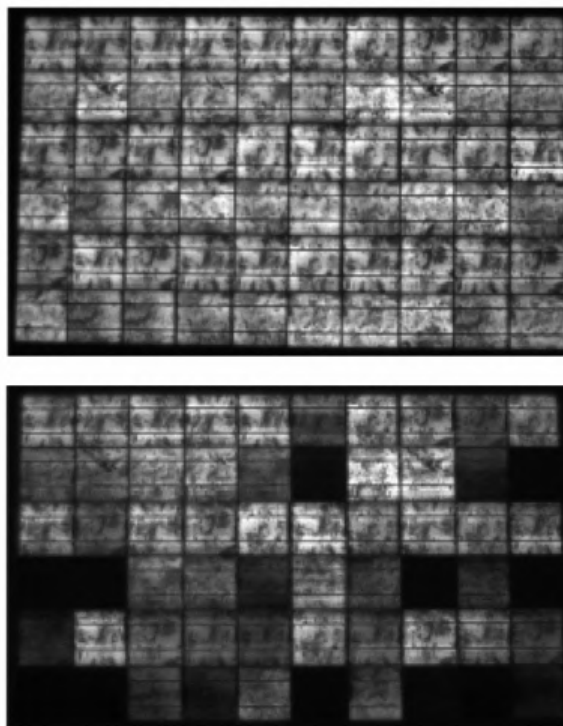
Além disso, as células afetadas pelo PID por períodos prolongados podem sofrer reações eletroquímicas em suas propriedades, que ocasionam outros tipos de degradação como a corrosão eletrolítica, delaminação do encapsulante ou degradação da camada antirreflexiva (FIGUEIREDO; ZILLES, 2015).

Em condições normais de operação o módulo opera sempre próximo ao ponto de potência máxima (Maximum Power Point - MPP), com seus valores de tensão (VMPP - Tensão no ponto de potência máxima) e corrente (IMPP - Corrente no ponto de potência máxima), e na ocorrência do PID esses valores são afetados ([MARTÍNEZ-MORENO; FIGUEIREDO; LORENZO, 2018](#)). Assim, a análise da curva I-V do módulo e seus parâmetros elétricos, como tensão de circuito aberto e tensão de operação, são testes típicos no diagnóstico do PID, devido à extrema redução na capacidade geradora do módulo, conforme mostra a figura 3 ([FIGUEIREDO; ZILLES, 2015](#); [VIDGU TECHNOLOGIES, 2018](#)).

Na prática, após a análise da curva I-V do módulo, as células devem ser desconectadas do módulo e analisadas separadamente, as supostamente afetadas e as desafetadas.

Imagens de eletroluminescência ([Figura 2](#)) podem indicar quais são as células mais afetadas pelo PID em um módulo, pois este é um fenômeno em que um material emite luz em resposta a uma corrente elétrica. Como a junção P-N em estado normal emite luz no comprimento de onda de eletroluminescência entre 0,9 e 1,3 μm , as células afetadas podem ser identificadas pois irão se apresentar mais escuras, sem brilho ([FIGUEIREDO; ZILLES, 2015](#); [VIDGU TECHNOLOGIES, 2018](#)).

Figura 2 – Imagens de eletroluminescência antes e depois de um painel passar por testes de PID



Fonte: ([PINGEL et al., 2010](#))

A utilização da eletroluminescência confirma que as células mais próximas ao centro do módulo são menos suscetíveis ao efeito PID, pois as imagens são mais escuras nas bordas que no centro (MARTÍNEZ-MORENO; FIGUEIREDO; LORENZO, 2018).

Testes infravermelho ou termográficos também apontam as células mais afetadas pelo PID, pois estas apresentarão temperaturas superiores às que não foram afetadas (VIDGU TECHNOLOGIES, 2018).

Martínez-Moreno et al. (2013) realizaram medidas pontuais de tensões de operação para avaliar o nível de degradação dos módulos em uma central fotovoltaica em operação, além de utilizarem as metodologias de eletroluminescência, imagens térmicas e medição da tensão de circuito aberto. Neste trabalho constatou-se que as medições das tensões de operação se mostraram mais eficazes pois retratavam as perdas de eficiência dos módulos afetados pelo PID, quando comparadas com módulos "saudáveis".

4.1.2 Regeneração

Algumas técnicas de regeneração pós efeito PID podem ser aplicadas tanto no campo quanto em laboratório e, em muitos dos casos, dependendo principalmente do grau de degradação desses módulos, os métodos de regeneração são mais vantajosos economicamente do que a substituição dos painéis e do sistema (PINGEL; JANKE; FRANK, 2012). Assim, as principais técnicas são:

- a) **Aterramento de um dos polos do gerador FV no campo:** garante que os módulos não terão um potencial negativo em relação à terra, evitando a ocorrência do PID (PINGEL et al., 2010). Pingel, Janke e Frank (2012) obtiveram, em média, 94% de regeneração dos módulos afetados com esse método, que se mostrou mais eficiente durante o verão.
- b) **Aplicação de uma tensão reversamente polarizada nos terminais do módulo afetado em laboratório ou no campo:** em laboratório, esta técnica se baseia basicamente na aplicação de um potencial inverso nos módulos afetados. No campo, existem equipamentos eletrônicos que funcionam como uma fonte de tensão, e realizam a aplicação de uma tensão inversa à do sistema de forma programada no período da noite, chamados de equalizadores (PINGEL et al., 2010; PINGEL; JANKE; FRANK, 2012). Esses sistemas revertem os efeitos causados pelo PID pois o campo elétrico invertido remove os íons de sódio que foram armazenados na camada antirreflexiva da célula durante o período de funcionamento (OVANDO et al., 2018).
- c) **Exposição dos módulos afetados à altas temperaturas por um período de tempo:** temperaturas elevadas diminuem a concentração de íons de sódio polarizados na parte ativa das células afetadas, reduzindo o processo

de recombinação no emissor e, conseqüentemente, aumentando a resistência paralela afetada pelo efeito PID ([HYLSKY; STRACHALA; VAN K, 2016](#)).

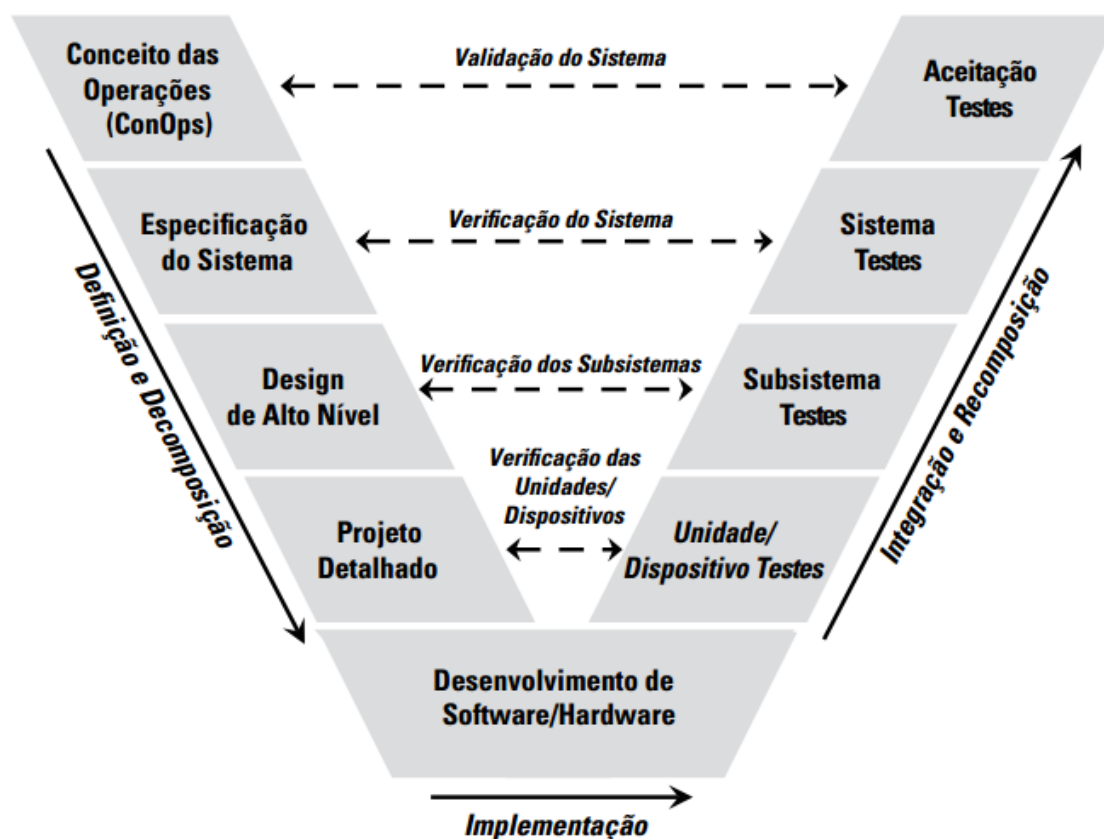
5 METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo de um dispositivo capaz de realizar a medição de tensão e corrente em módulos fotovoltaicos em operação, e o envio de dados para um servidor remoto para posterior análise. Dito isto, este capítulo apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento do protótipo de dispositivo de medição, em todas suas etapas.

5.1 Modelo V

A metodologia adotada para este trabalho é baseada no conceito do Modelo V (*V-Model*), desenvolvido por especialistas de sistemas complexos na área de Engenharia de Sistemas. Enquanto os modelos tradicionais têm por característica uma sequência linear e horizontal de atividades, com um fluxo único, o Modelo V relaciona cada fase do ciclo de vida de desenvolvimento do projeto à sua fase de teste, ou seja, para cada etapa de desenvolvimento é realizado um teste, fluindo em forma de V, literalmente. Assim, se torna mais fácil estabelecer a viabilidade do projeto, quantificar riscos e verificar falhas. Caso algum desses testes falhe, é necessário retornar à sua etapa correspondente. (FORSBERG; MOOZ, 1992; SHAMIEH, 2011).

Figura 3 – Modelo V



Fonte: (SHAMIEH, 2011)

Assim, conforme [Figura 3](#), o modelo V se inicia com as necessidades do usuário no canto superior esquerdo, e termina com a validação do sistema pelo usuário no canto superior direito, sendo dividido em duas fases: Definição e Decomposição; e Integração e Recomposição. Em cada uma dessas fases, são realizadas suas respectivas etapas, como mostra o [Quadro 3](#).

Em cada etapa da fase de Definição e Decomposição do sistema, são criados os requisitos para a próxima etapa, os planos de verificação da implementação e os planos de teste, de forma que todas as etapas desta fase são conectadas às etapas da fase de Integração e Recomposição. Assim, torna-se mais fácil verificar e atender todos os requisitos necessários para que o sistema atue de forma eficaz, de acordo com as especificações apresentadas pelo usuário. Estas conexões também são conhecidas como “rastreamento” (SHAMIEH, 2011).

Quadro 3 – Descrição das etapas do Modelo V

Etapa	Descrição
Conceito de Operações	Identifica as necessidades do usuário, a viabilidade do sistema e desenvolve seu conceito, com funções e responsabilidades.
Especificação do Sistema	Detalha os requisitos necessários para o sistema atender às especificações do usuário, pré-definidas na fase do Conceito de Operações, estabelecendo o que o sistema deve realizar.
Design de Alto Nível	Expande os requisitos do sistema em uma arquitetura de alto nível, considerando as operações que o sistema deve realizar e a integração com outros sistemas.
Projeto Detalhado	Especifica os componentes necessários para compor o sistema baseando-se em seus requisitos, dando suporte à compra de materiais (hardware).
Desenvolvimento de Software e Hardware	Busca a tecnologia adequada para suprir as necessidades do sistema, com desenvolvimento de hardware e software (codificação).
Testes Unitários	Consiste em realizar o teste de cada componente do hardware, verificando se suas funções estão de acordo com as necessidades do sistema.
Teste do Subsistema	Testes com a integração dos componentes de hardware e software.
Teste do Sistema	Integração dos subsistemas e teste do sistema completo, buscando verificar se todos os requisitos foram atendidos.
Testes de Aceitação	Verifica se todo o sistema atende às especificações do usuário.

Fonte – Autor. Adaptado de: (SHAMIEH, 2011)

Para este trabalho, cada etapa do Modelo V descreve o desenvolvimento do dispositivo. Iniciando com o entendimento das particularidades e necessidades do dispositivo, que consiste em realizar a medição remota de tensão e corrente em módulos fotovoltaicos, verifica-se as possibilidades de execução, seu conceito geral de funcionamento e seus objetivos. Assim, pode-se determinar as especificações e os requisitos de cada módulo que compõe este dispositivo, neste caso, os módulos de tensão e corrente, assim como a tecnologia de comunicação a ser utilizada e afins. Após realizar a definição de todos os requisitos, é idealizada a arquitetura deste dispositivo, a definição de todos seus componentes e materiais e, então, o desenvolvimento de cada um dos módulos. Em seguida, são realizados os testes unitários para então verificar se cada um deles atendem os requisitos propostos, e a integração desses módulos, dando origem ao protótipo do dispositivo completo. Sua última etapa consiste na realização do teste final, que verifica se o dispositivo cumpre seu objetivo. Cada uma dessas etapas será descrita no capítulo a seguir.

6 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

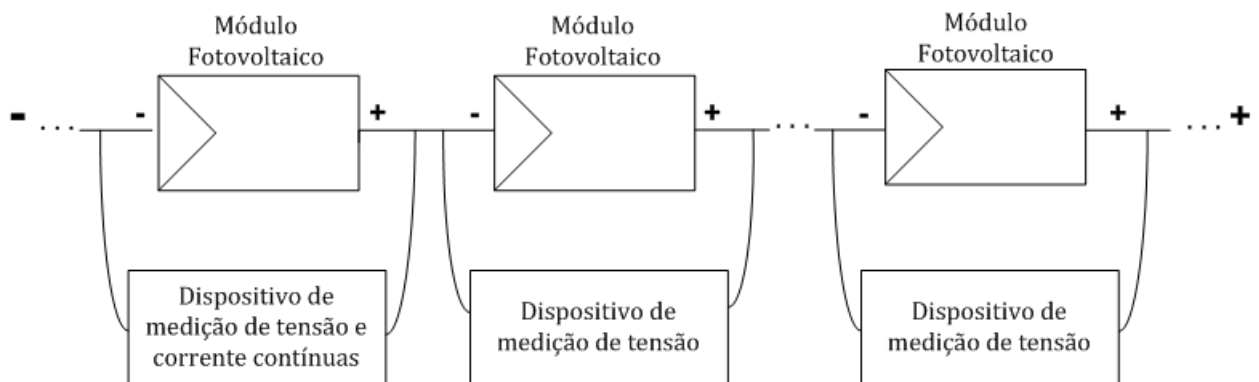
Este capítulo descreve o desenvolvimento do protótipo do dispositivo. Sua fase preliminar consistiu no entendimento do problema de pesquisa e seu contexto, assim como no estudo teórico do tema exposto. Posteriormente, as etapas seguiram conforme exposto na Metodologia.

6.1 Conceito de Operações

Esta etapa consiste na identificação das necessidades do dispositivo para que o mesmo possa ser idealizado de forma a solucionar o problema evidenciado, especificando suas funções.

Deve-se ressaltar que, para este projeto, o dispositivo realizará a medição de tensão individualmente em cada módulo, e cada módulo pode ser composto por até 72 células fotovoltaicas em série. Assim, identificamos que serão necessários dois tipos de dispositivo: um para medir, em conjunto, tensão e corrente contínuas, e outro apenas tensão. Isso se justifica pela necessidade de se obter o valor de tensão específico de cada módulo fotovoltaico, enquanto a corrente pode ser apenas uma medição para toda a série de módulos (*string*). Desta forma, após validação de conceito, quando posto em operação no campo, em cada *string* deverá ser inserido, pelo menos, dois dispositivos: um para medição de tensão e corrente no módulo mais ao negativo da *string*, e outro para medição de tensão no módulo mais ao positivo, conforme [Figura 4](#).

Figura 4 – Diagrama representativo do dispositivo inserido em uma *string* fotovoltaica



Fonte: Autor

O dispositivo deve operar com o menor consumo de energia possível. Em função disso, as medições podem ser feitas em intervalos de 1h por dia, e no restante do tempo o dispositivo deve ficar em modo de espera (*sleep mode*).

Na ocorrência do efeito PID, tipicamente, a tensão degrada primeiro nos módulos mais próximos ao polo negativo do inversor.

A detecção do efeito PID pode ser obtida através da comparação dos valores de tensão de circuito aberto dos módulos, em condições semelhantes de irradiância e temperatura de operação. Ao se verificar uma diminuição da tensão de circuito aberto ao longo do tempo, que seja numa intensidade superior à especificação técnica do fabricante, isto pode ser um indicativo de degradação PID. Outro fator indicativo deste tipo de degradação é a constatação de que a taxa de diminuição da tensão de circuito aberto ao longo do tempo é maior nos módulos mais próximos ao polo negativo do inversor do que naqueles mais próximos ao polo positivo.

A medição da tensão de circuito aberto de um sistema solar em operação é realizada no momento em que a corrente é igual a zero e existe irradiância suficiente para produzir tensão nos terminais do módulo. Esta condição ocorre na primeira hora da manhã, quando os inversores estão sendo inicializados (há tensão nos módulos e não há corrente).

A medição de corrente permite que a detecção do efeito PID possa ser realizada, também, avaliando-se a degradação da tensão durante a operação do gerador FV. Para tanto, é necessário comparar-se o valor da tensão de um tempo anterior com o valor atual, considerando-se o mesmo nível de corrente de operação. Para uma maior precisão, pode-se utilizar também um sensor de temperatura de operação do módulo para garantir a comparação nas mesmas condições. Porém, no presente trabalho, o sensor de temperatura não faz parte do escopo.

A medição de corrente possibilita, ainda, o cálculo da potência gerada em cada módulo. Portanto, embora não seja indispensável, optou-se pela utilização de, pelo menos, um dispositivo com funcionalidade de medição de corrente.

6.2 Especificação do Sistema (Requisitos)

Nesta etapa foram definidos todos os requisitos do dispositivo, de acordo com as exigências do projeto e suas necessidades funcionais.

6.2.1 Módulo de Medição de Tensão

Conforme mencionado, a medição de tensão ocorrerá individualmente em cada módulo, e cada módulo pode ser composto por até 72 células em série, com aproximadamente 42V de circuito aberto. A tensão de circuito aberto é a tensão máxima que um módulo é

capaz de produzir quando submetido à radiação solar e sem carga, de modo que não haja corrente elétrica circulando nos terminais.

O módulo de medição de tensão presente no dispositivo foi especificado com uma margem de segurança para o caso de haver algum erro no sistema que possa vir a gerar sobretensão, sendo assim projetado para medir até 160V, com um conversor A/D de 16 bits. Deve haver um divisor resistivo para condicionamento de sinal, e a comunicação da saída do conversor com o microcontrolador. Este divisor resistivo deve ser especificado para reduzir uma tensão de operação do módulo para a tensão de funcionamento do microcontrolador.

6.2.2 Módulo de Medição de Corrente

O módulo de medição de corrente medirá uma corrente de aproximadamente 9A. Porém, o ideal é que ele suporte até o dobro da corrente que normalmente irá circular, pois assim como o módulo de medição de tensão, se houver qualquer condição de erro ou falha, ele será capaz de suportar. Assim, especificou-se um sensor para medição de corrente contínua indireta de 20A, com um conversor A/D também de 16 bits, o qual irá se comunicar com o microcontrolador. Esse módulo precisará estar presente somente em um dispositivo, que compartilhará o mesmo microcontrolador com um dos módulos de tensão.

6.2.3 Comunicação

Tendo em vista que cada dispositivo conectado aos módulos solares deve enviar suas medições sem que seja necessária a intervenção humana, é necessário que estes dispositivos estejam conectados a uma rede, de modo a enviar suas informações para uma base de dados via Internet. Essas informações serão armazenadas num servidor, para posterior análise. Especificou-se para este projeto a utilização da tecnologia WiFi por meio de uma antena.

Vale ressaltar que existe a possibilidade de se utilizar uma antena externa, porém não é escopo deste trabalho a necessidade de sua utilização ou não.

6.2.4 Fonte de Alimentação

A energia para utilização dos dispositivos serão provenientes do próprio módulo. Por isso, é necessário utilizar uma fonte de alimentação para extrair energia contínua operando na faixa de 20V até 50V e realizar a conversão desse valor para o valor de tensão de operação do dispositivo, para ser possível utilizar módulos fotovoltaicos de até 72 células.

6.2.5 Estrutura Física

O dispositivo desenvolvido será conectado ao módulo solar fixando-o em sua estrutura metálica, e por isso estará exposto ao tempo. Desta forma, deve ser adequado para suportar condições climáticas de campo aberto, sendo necessário estar inserido em um invólucro de montagem, onde não pode entrar poeira nem umidade, e a utilização de cabos e conectores específicos para ligações elétricas solares.

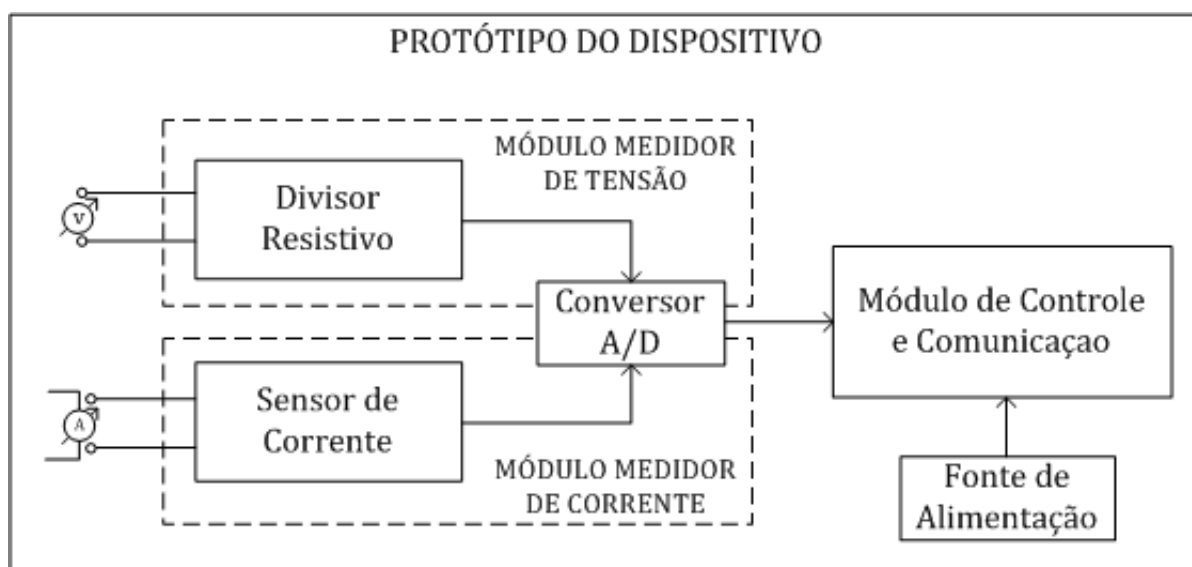
Esse dispositivo deve estar disposto com uma distância de pelo menos 1 metro do módulo solar ao qual se refere, e haverá pelo menos 1 metro de distância entre cada módulo.

Um fato a ser analisado, porém não faz parte do escopo deste trabalho, é a posição ideal dos dispositivos em relação ao módulo: se devem ficar abrigados pelo painel embaixo do módulo, para estarem mais protegidos ou totalmente expostos ao tempo, facilitando a transmissão dos dados via WiFi.

6.3 Design de Alto Nível

O escopo deste trabalho é o protótipo do dispositivo medidor de tensão e corrente contínuas para os módulos fotovoltaicos. Nesta etapa, é projetada a arquitetura do dispositivo (Figura 5), considerando suas operações e a integração de todos seus componentes, inseridos em seus subsistemas. Neste tópico ainda, são definidos também o projeto da placa de circuito impresso e o circuito eletrônico final.

Figura 5 – Diagrama da arquitetura do protótipo do dispositivo



Fonte: Autor

- a) **Módulo de Medição de Tensão:** composto pelo conversor A/D e pelo divisor resistivo que fará a redução do valor de tensão de entrada proveniente dos módulos para um valor que seja possível ser lido pelo conversor.
- b) **Módulo de Medição de Corrente:** composto pelo sensor de corrente especificado e pelo conversor A/D que fará a leitura do sinal, o mesmo utilizado no módulo de medição de tensão.
- c) **Módulo de Controle e Comunicação:** placa eletrônica responsável pela leitura e envio dos dados provenientes dos canais do conversor A/D para servidor via WiFi, assim como a interligação de todo sistema, como a fonte de alimentação, e todos os outros módulos. Neste módulo também ficará inserida toda a parte de programação do dispositivo.
- d) **Fonte de Alimentação:** responsável pela alimentação de todo sistema.

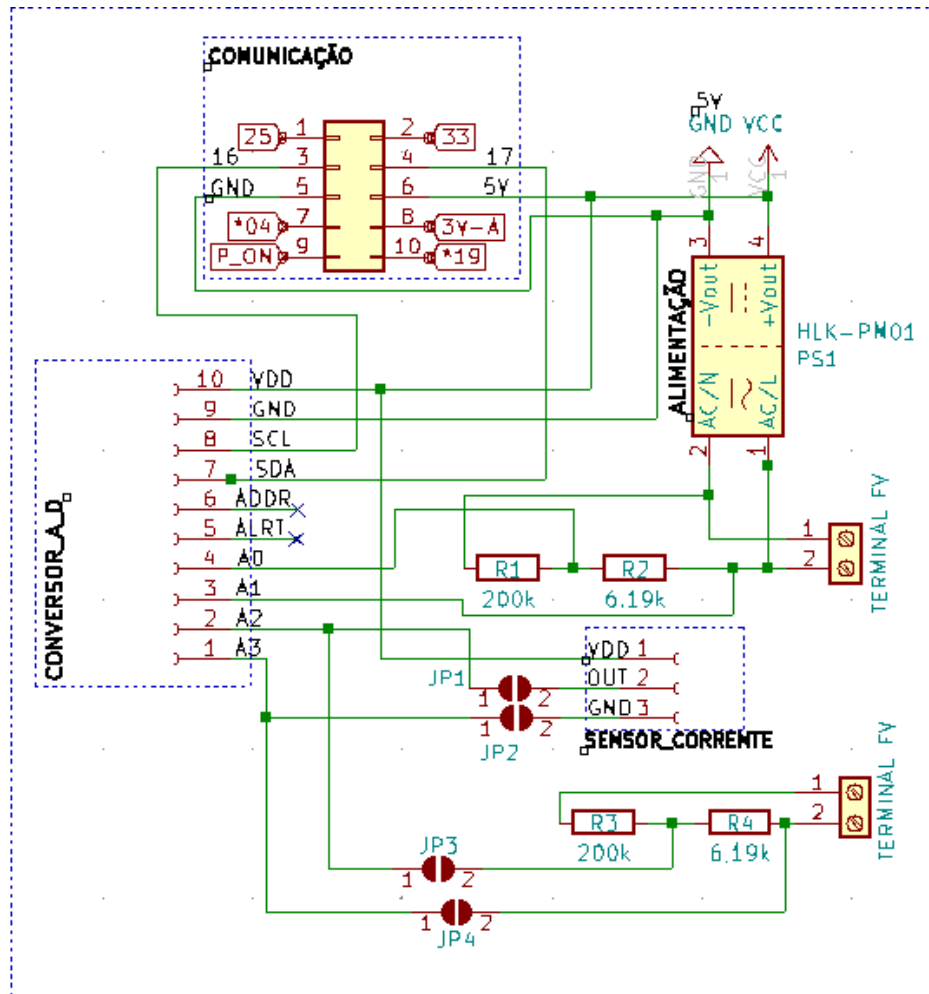
6.3.1 Pré-definição do projeto da Placa de Circuito Impresso

Nesta etapa, é possível pré-definir como devem ser as interligações entre os módulos (subsistemas) mencionados anteriormente, dando origem a uma pré-visualização do sistema como um todo e seu *layout* na placa de circuito impresso, ou PCB (*Printed Circuit Board*), onde serão inseridos os componentes eletrônicos. Para isso, foi utilizado o *software* Kicad¹ para desenvolvimento do projeto.

Na [Figura 6](#) é possível visualizar o esquema do protótipo, onde é mostrado como estão dispostos os módulos na placa, as conexões entre os módulos, os canais de alimentação, referencial terra e transmissão de dados.

¹ O Kicad é um *software* de código aberto para a concepção de PCBs, passando por todas as etapas de desenvolvimento de seu design, desde a criação do esquema e idealização de seu *layout*, seleção dos seus componentes e interligações, até sua versão final, com visualização em 3D e geração de arquivos do tipo Gerber, que são utilizados em sua fotopltagem.

Figura 6 – Esquema do protótipo no Kicad



Fonte: Autor

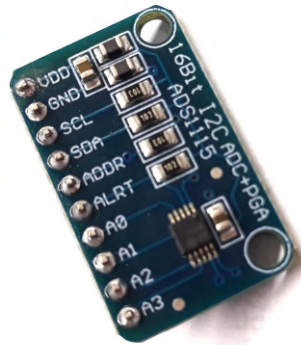
6.4 Projeto Detalhado

Esta etapa define todos os componentes necessários para o desenvolvimento do protótipo, de acordo com seus requisitos. Em seguida, será realizado um teste para cada componente para verificar se atendem às especificações. Após esta etapa de definição, o projeto final da PCB pode ser desenvolvido, composto pelos componentes definidos neste tópico e suas trilhas de conexão.

- a) **Medição de Tensão:** para a medição de tensão, foi definido que será utilizado um divisor resistivo para reduzir a tensão de entrada para a tensão máxima suportada pelo dispositivo, e o chip conversor A/D (analogico-digital) no modelo ADS1115 (Figura 7), do fabricante Texas Instruments.

O divisor resistivo tem como finalidade gerar uma tensão de saída proporcional à tensão de entrada, porém em escala menor. Desta forma, foi considerado,

Figura 7 – Conversor A/D - Modelo ADS1115



Fonte: Autor

como uma margem de segurança, que é possível obter uma tensão de até 160V de entrada, vinda dos módulos. Sendo assim, de acordo com a equação 6.1 para divisor resistivo, e com a restrição de se utilizar componentes disponíveis no laboratório para a construção do primeiro protótipo, atribuiu-se os valores abaixo:

$$V_{saída} = V_{entrada} * \frac{R2}{R1 + R2} \quad (6.1)$$

R1 = 200K ohm

R2 = 6,19K ohm

Para uma tensão de entrada de **Ventrada** = 160 V

$$\begin{aligned} V_{saída} &= 160 * \frac{6,19K}{200K + 6,19K} \\ V_{saída} &= 160 * 0,03002 \\ V_{saída} &= 4,803V \end{aligned}$$

Assim, foram definidos os resistores de 200K e 6,19K (Figura 8).

Após passar pelo divisor resistivo, a tensão, já reduzida, é sinal de entrada no conversor A/D. Esse conversor faz a leitura do valor de tensão analógica e o transforma, internamente, em um sinal digital, que varia entre 0 (0V) e 1 (3,3V), formando um conjunto de bits que corresponde ao valor analógico de tensão lido.

O ADS1115 é um conversor analógico-digital com tensão de operação de 2 a 5,5V, 16 bits de precisão e taxa de amostragem de até 860 amostras por segundo.

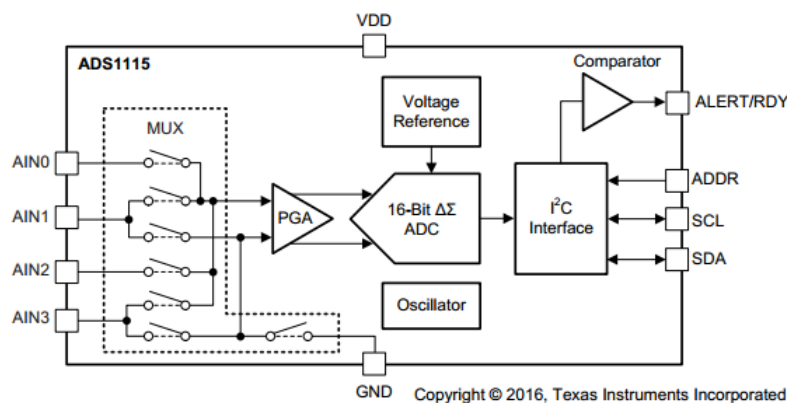
Figura 8 – Resistores de 6,19k e 200k



Fonte: Autor

Possui interface I2C, 4 canais de entrada e um multiplexador (MUX), que permite que ele funcione com dois canais diferenciais ou 4 canais independentes, além de ter um amplificador de ganho programável (PGA - *Programmable Gain Amplifier*), conforme mostra o Diagrama de Blocos da Figura 9. Deve-se ressaltar que o valor de tensão de alimentação é referência para os valores de tensão nas entradas dos canais.

Figura 9 – Diagrama de Blocos do ADS1115



Fonte: Datasheet do ADS1115

O valor lido pelos canais do ADS é em nível lógico (NL), ou seja, na faixa de bits, e a tensão de entrada nos canais analógicos nunca devem ser maiores que a tensão de alimentação do ADS (VDD), sendo necessário configurar a faixa de entrada de acordo com o VDD, sendo as seguintes opções: $\pm 6,144$ V, $\pm 4,096$ V, $\pm 2,048$ V, $\pm 1,024$ V, $\pm 0,512$ V, $\pm 0,256$ V. Considerando que o conversor possui 16 bits de precisão, sendo 1 bit de sinal, temos um valor em NL de $2^{15} = 32768$. Assim, para a conversão do sinal de NL para Volts, e com faixa de escala configurada como $\pm 4,096$ V, tem-se:

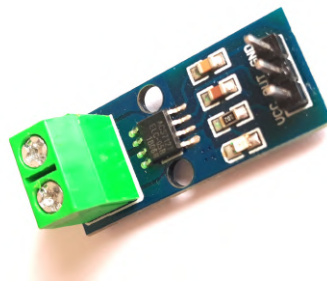
$$Resolução(Res) = \frac{4,096}{2^{15}}$$

$$Res = \frac{4,096}{32768}$$
$$Res = 0,000125$$

Esse valor de 0,000125 quer dizer que para cada valor em NL, temos 0,125mV. Desta forma, quando o ADS faz a leitura do sinal em NL, basta multiplicar por 0,000125 para obtermos o valor referente em Volts. Esta conversão será inserida no código de programação no dispositivo.

- b) **Medidor de Corrente:** foi escolhido o sensor de corrente de Efeito Hall, no modelo ACS712 (Figura 10), do fabricante Allegro. Este sensor é do tipo invasivo, ou seja, é necessário interromper o circuito para realizar a medição. Está disponível em diferentes modelos, de acordo com a faixa de corrente, e quando há a passagem de corrente utiliza o Efeito Hall para gerar uma saída de tensão proporcional ao fluxo da corrente. O Efeito Hall, de forma resumida, ocorre quando uma corrente tem seu caminho desviado pela ação de um campo magnético. De forma prática, este sensor possui um caminho de condução de cobre que, quando há a passagem de corrente, um campo magnético é gerado. Este campo promove direções diferentes para as cargas positivas e negativas da corrente, gerando uma diferença de potencial que pode ser medida e é proporcional ao valor de corrente.

Figura 10 – Sensor de corrente de efeito hall - Modelo ACS712



Fonte: Autor

Assim como ocorre no módulo de medição de tensão, o ACS é um transdutor, ou seja, é necessário conectá-lo a um ADC para ter seu sinal lido. O sinal proveniente do sensor de corrente (valor de tensão) é sinal de entrada nos canais do conversor (ADS1115), que faz a conversão do valor analógico para valor em NL. Esse valor em NL é enviado para o módulo de comunicação e controle, onde é realizado o cálculo para transformá-lo em um valor analógico de tensão e, em seguida, é feita a manipulação para se obter o valor de corrente correspondente. É importante explicar que, como este sensor faz a leitura tanto

de valores positivos quanto negativos de corrente, sua escala se inicia para os valores negativos de corrente (e tensão). De acordo com o datasheet do ACS712, o valor de tensão quando se tem 0A de entrada é metade da faixa do V_{cc} ($\frac{V_{cc}}{2}$), e sua tensão de operação é de 5V. Assim, os valores de tensão variam da seguinte forma (Tabela 1):

Fundo de escala (menor valor)	0V
0A	2.5V
Topo de escala (maior valor)	5V

Tabela 1 – Variação dos valores de tensão no ACS712

Embora o ideal fosse utilizar o sensor de 20A, conforme exposto anteriormente, foi utilizado o sensor de 10A, pois era o que estava disponível de forma mais fácil no momento, e para fins de teste do protótipo ele é suficiente. A partir dos testes realizados para que fosse feita a calibração da medição e o cálculo de conversão de NL para corrente, verificou-se que o sensor consegue medir até 10,8A, tanto positivo quanto negativo. Além disso, conforme exposto anteriormente, 0A corresponde à 2,5V que, por sua vez, corresponde a 20086 em nível lógico (valor recebido pelo módulo de controle) .

Para que os valores medidos através do ADS sejam transformados em valores de corrente, o seguinte cálculo está inserido no código referente ao módulo de corrente:

$$\text{Corrente} = (\text{valor medido} - 20086) * 0,0006637 \quad (6.2)$$

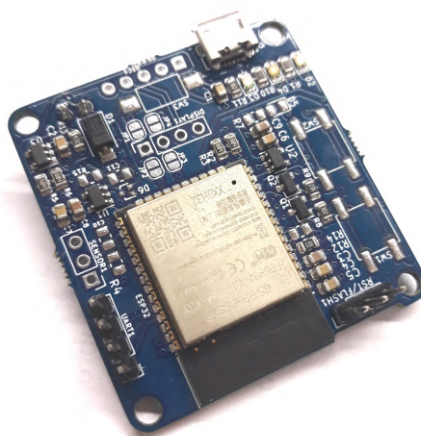
- c) **Controle e Comunicação:** a tecnologia de WiFi definida para este projeto foi de 2,4GHz, no padrão IEEE 802.11 b/g/n. Para realizar a integração dos componentes do dispositivo e a aquisição dos dados pelos sensores, será utilizado o sistema de telemetria comercial do tipo IoT, que será descrito a seguir.

- **Dispositivo IoT:** Dispositivo de aquisição de dados por meio de sensores digitais, por efeito hall ou sinal analógico baseado em microprocessador ARM, alimentado por fonte externa e dotado de bateria interna recarregável para funcionamento em interrupção do fornecimento de energia, relógio interno com bateria independente e com comunicação básica WiFi e *Bluetooth* mas com capacidade de expansão, via módulos externos, para rede LoRa ou GSM com gerenciamento de energia ativo. O dispositivo ainda possui 2 botões de propósito geral e display OLED para interface com usuário, bem como LEDs de indicação de alimentação, *status* de operação e recarga da bateria. Demais recursos de

software são: Modo de operação normal *Online* e modo de operação *Offline* com sistema limitado de *buffer* e sincronização dos dados de medição, interface de configuração via rede WiFi ou P2P através de *browser* e sistema de atualização OTA para funções existentes ou para adição de novas funções ao sistema.

Os dados adquiridos através deste módulo são enviados para um servidor MQTT. É importante ressaltar que um microcontrolador ESP32, já está inserido neste dispositivo IoT (Figura 11). Trata-se de um módulo de alto desempenho, baixo custo e baixo consumo de energia, com tecnologia WiFi e *Bluetooth*, e antena embutida, muito utilizado para aplicações IoT.

Figura 11 – Dispositivo IoT



Fonte: Autor

- d) **Fonte de Alimentação:** o dispositivo IoT possui tensão nominal de 5VDC, e por isso é necessário uma fonte DC/DC pra se conectar direto ao módulo fotovoltaico, realizando um "step-down". A fonte escolhida é a Mini Fonte HLK-PM01 (Figura 12), que é uma fonte AC/DC chaveada, com retificador de entrada, capaz de converter tensões alternadas entre 100 a 240VAC em tensão contínua de 5VDC, suportando uma corrente de entrada de até 0,1A e corrente de saída até 0,6A. É importante saber que, como esta fonte possui um retificador de onda completa na entrada, é possível também trabalhar com tensão contínua. Porém, é preciso observar para que o limite de corrente na entrada não seja superado. Ao trabalhar com tensões abaixo do valor típico que o fabricante sugere para entrada, como é no caso deste trabalho, é necessária uma corrente maior na entrada para manter o valor de potência de saída em 3W. Desta forma, caso esse valor de corrente seja maior que o limite especificado, pode ocorrer a queima dos componentes de retificação da entrada ou diminuir sua vida útil.

Figura 12 – Fonte de Alimentação - Mini Fonte HLK-PM01



Fonte: Autor

- e) **Conectores MC4 e Cabo Solar:** conforme dito anteriormente, é necessário que o dispositivo esteja exposto em campo aberto, e por isso, é necessário a utilização de conectores e cabos específicos para essas condições. Assim, serão utilizados os conectores no padrão MC4 (Figura 13) e cabos solares, ideais para ligações elétricas solares (Figura 14).

Figura 13 – Conectores no padrão MC4



Fonte: Autor

Figura 14 – Cabos solares



Fonte: Autor

6.4.1 Preço de Custo do Protótipo

A degradação por efeito PID resulta em uma redução de eficiência da placa FV e, conseqüentemente, essa redução se configura também em uma perda financeira, uma vez que a produção de energia é menor. O protótipo desenvolvido tem o objetivo de reduzir tais perdas, portanto, é importante calcular seu preço de custo. Para tal, tem-se especificado para confecção deste protótipo os seguintes componentes e seus respectivos valores:

Componente	Quantidade	Valor Total
Conversor A/D - ADS1115	1	R\$ 35,00
Medidor de Corrente - ACS712	1	R\$ 7,86
Resistor de 10kOhm	2	R\$ 0,26
Resistor de 300Ohm	2	R\$ 0,26
Fonte de Alimentação - HiLink	1	R\$ 9,63
Dispositivo IoT	1	R\$ 250,00
Conector MC4 (par)	2 pares	R\$ 30,00
Cabo Solar (m)	4m	R\$ 40,00
Bornes de Ligação	2	R\$ 2,80
Barras de Pinos	3	R\$ 4,50
Fabricação da Placa	-	R\$ 20,00
Valor total		R\$ 400,31

Tabela 2 – Tabela de Preços dos Componentes utilizados no Protótipo

6.5 Desenvolvimento de Software e Hardware

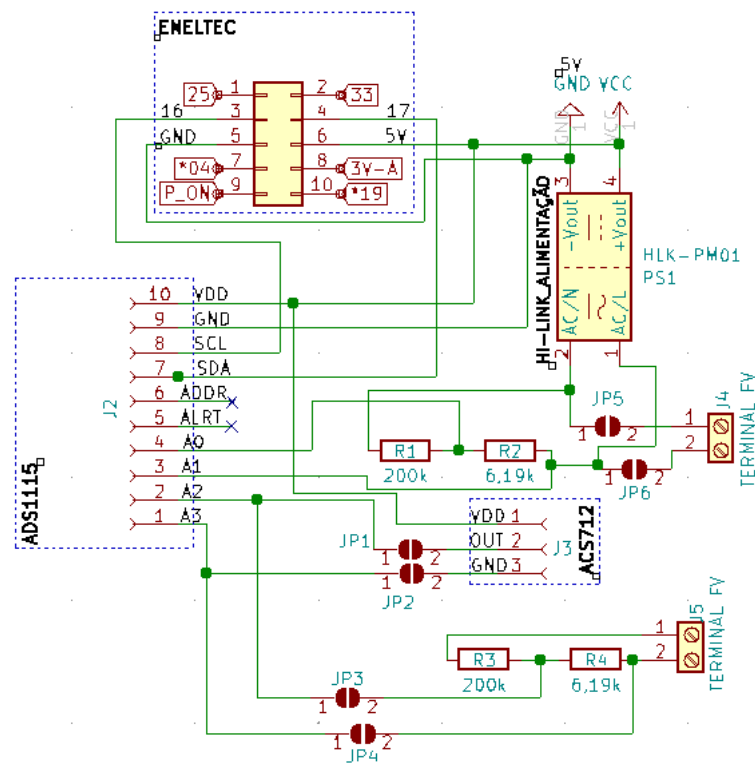
Nesta seção será apresentada o processo de desenvolvimento da PCB e a placa final já montada, com seus componentes soldados, a codificação dos sensores utilizados e as interfaces de configuração da placa e de leitura de dados.

6.5.1 Desenvolvimento e Montagem da Placa de Circuito Impresso com Componentes

Após a seleção dos componentes descritos no tópico anterior, foi finalizada a etapa de desenvolvimento da PCB no *software* Kicad. Os componentes escolhidos e suas trilhas de conexão foram inseridos no Esquemático (Figura 15), de acordo com a necessidade do dispositivo.

De forma breve, na Figura 15 pode-se ver que as trilhas de alimentação (VCC) e referencial terra (GND) conectam a fonte Hi-Link ao dispositivo IoT, ao ADS e ao ACS. Dessa forma, todo circuito está alimentado. A tensão vinda do módulo FV também vai direto para o divisor resistivo, que segue como entrada nos canais A0 e A1 no ADS. Assim, o valor de tensão diferencial é medido. Esta placa permite a utilização dos canais do ADS para realizar a medição de tensão de 2 módulos FV, ou a medição de tensão e corrente de 1 módulo. Então, caso o usuário opte por realizar a medição da corrente junto com a tensão do mesmo módulo, basta "fechar" os *jumpers* (JP1 e JP2) com solda e fazer a ligação física com os cabos vindos do módulo nas entradas do ACS. Desta forma, o sinal de saída e o GND do ACS serão entrada nos canais A2 e A3 do ADS. Por outro lado, caso opte por realizar a medição de tensão de 2 módulos diferentes, basta soldar os *jumpers* JP3 e JP4 e utilizar também o segundo terminal FV, que é conectado diretamente a um segundo divisor resistivo, e segue como entrada para os canais A2 e A3 do ADS.

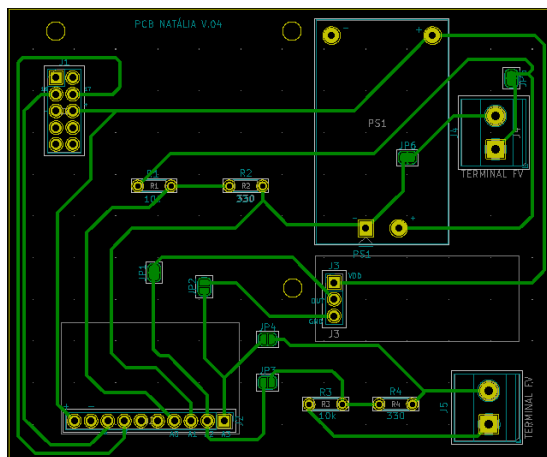
Figura 15 – Esquemático da PCB no Kicad



Fonte: Autor

Prosseguindo, a próxima etapa foi confeccionar, de fato, a PCB. Para isso, foram gerados os arquivos *Gerbers* (Figura 16) que foram utilizados. Esse arquivos mostram exatamente como ficarão a disposição dos componentes e das trilhas depois de sua confecção.

Figura 16 – Gerber da PCB



Fonte: Autor

Com os *Gerbers* prontos, foi utilizada a Prototipadora ProtoMat S64, da marca LPKF (Figura 17), disponível no laboratório do Polo de Inovação Campos dos Goytacazes (PICG).

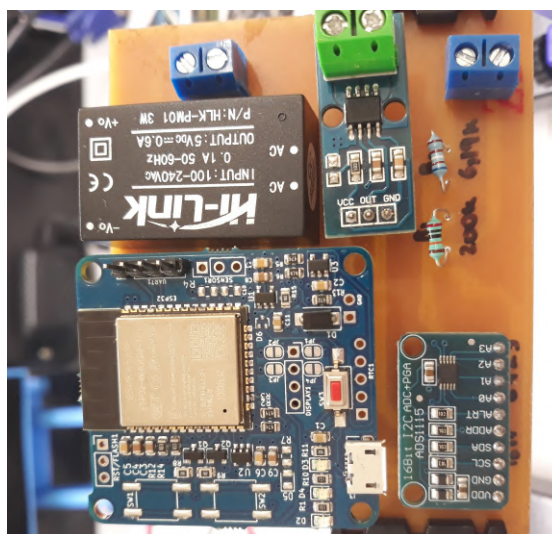
Figura 17 – Prototipadora ProtoMat S64 LPKF



Fonte: Autor

Com a PCB pronta, realizou-se as soldas dos componentes. O resultado final da placa soldada pode ser visto na Figura 18.

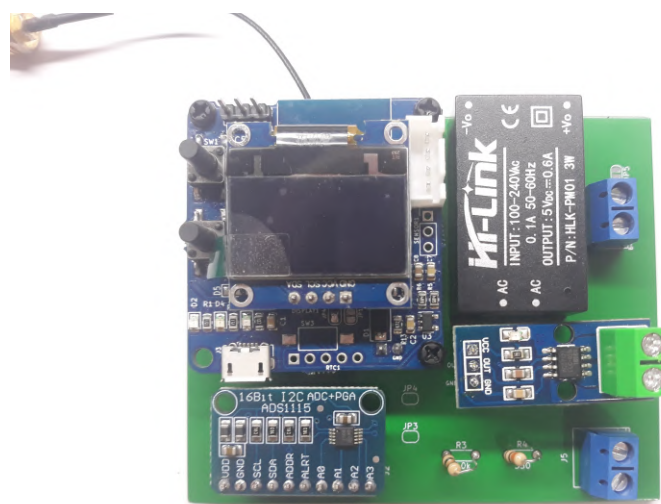
Figura 18 – PCB com componentes soldados



Fonte: Autor

Para a realização dos testes apresentados neste trabalho, utilizou-se a placa acima construída. Após a comprovação dos testes, uma versão de melhor qualidade foi fabricada conforme [Figura 19](#). Porém, os testes com essa segunda versão não fez parte do escopo desse trabalho.

Figura 19 – Segunda versão da PCB fabricada posteriormente



Fonte: Autor

6.5.2 Códigos

O código de programação embarcado no microcontrolador ESP32 utiliza a linguagem MicroPython. Ele foi dividido em duas partes: a primeira, "*Main*", é responsável por chamar o código principal, habilitar a reprogramação dos códigos inseridos na placa e a configuração da rede de WiFi, caso seja necessário. Para essas duas últimas funções, o usuário deve pressionar os botões da placa enquanto a mesma é energizada, e assim o sistema irá habilitar cada função automaticamente. A segunda parte da programação, "*ProgFinal*", contém toda a parte da configuração da comunicação, aquisição dos dados provenientes do ADS, conversões e tratamento desses valores, e envio dos dados para o servidor MQTT. Os códigos estão disponíveis no [Anexo A](#).

6.5.3 Interface de Configuração

Conforme explicado anteriormente, o sistema envia seus dados de leitura via WiFi para um servidor online e, portanto, é necessário configurar a rede WiFi do local onde está sendo utilizado no dispositivo. Para que seja possível modificar a rede utilizada sempre que for necessário, sem a necessidade de interromper e alterar o código, há uma interface

de configuração de rede (Figura 20) que é chamada quando pressionamos o botão que está soldado na placa enquanto o dispositivo é energizado. Nesse momento, a tela de configuração é aberta e o usuário pode inserir as informações da nova rede a ser utilizada. Além disso, o usuário pode configurar outros parâmetros internos do código nessa mesma tela, como o nome do tópico no servidor onde serão salvos os dados, e os valores de ganho e *offset* para os medidores de sensor e corrente.

Figura 20 – Interface de configuração



The image shows a configuration window titled "Medidor Natalia". It contains several input fields and two buttons at the bottom. The fields are: SSID (WIFI-NATALIA), PASSWORD (masked with dots), TOPIC (natalia/medidor), V GAIN (1), V OFFSET (0), I GAIN (1), and I OFFSET (0). The "Update" and "Cancel" buttons are blue.

Fonte: Autor

6.6 Testes Unitários

Os testes unitários verificam se os componentes selecionados atendem às necessidades do sistema. Para isso, serão apresentados os principais requisitos para os testes unitários de cada componente dentro de seu módulo, e a descrição do teste de cada um deles, de acordo com seus requisitos.

Para os testes, foram utilizados, basicamente:

- *protoboard*;
- *jumpers*;
- **NodeMCU com ESP32** para simular o módulo de comunicação/controler;
- **multímetro** da marca Fluke no modelo 179 (Figura 21), com precisão de 0,09%+2 e resolução máxima de 0,1 mV;

Figura 21 – Multímetro Fluke 179



Fonte: Autor

- **fonte de alimentação DC** de bancada BK Precision 9130 (Figura 22), com 3 saídas programáveis, podendo fornecer 0-30V e 0-3A em seus canais independentes, e também ter seus canais configurados em série ou paralelo. Sua precisão é de 0,03% + 10mV.

Figura 22 – Fonte de Bancada BK Precision



Fonte: Autor

6.6.1 Conversor A/D - ADS1115

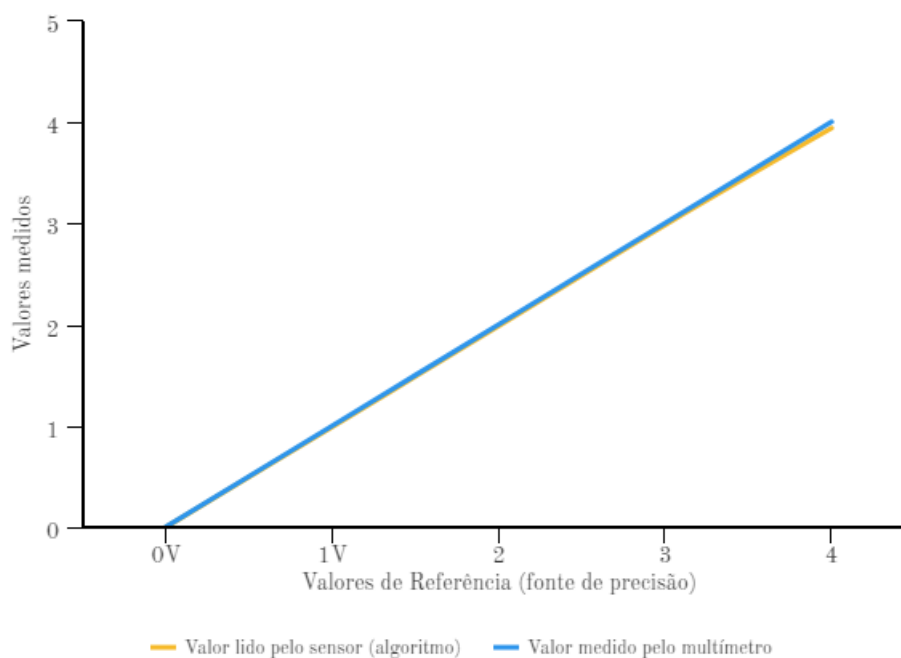
Para o teste do ADS1115, foram inseridos na protoboard o NodeMCU com o ESP32 para fazer a leitura dos dados nos canais do ADS e a alimentação do sistema.

Foram colocados valores de 0V a 4V na fonte de bancada, e realizada a medição com o multímetro diretamente nos canais do ADS. Os dados adquiridos estão dispostos na Tabela 3 e na Figura 23.

Valor na fonte (V)	Valor lido pelo sensor (algoritmo)	Valor medido com multímetro no ADS
0	0,002	0,006
1	0,994	1,005
2	1,988	2,006
3	2,989	3,007
4	3,944	4,006

Tabela 3 – Teste Unitário do ADS1115 (protoboard)

Figura 23 – Teste do ADS na protoboard



Fonte: Autor

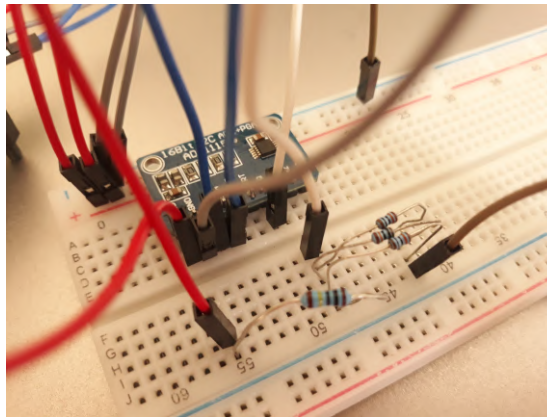
Para este teste, o critério de aceitação foi que o erro da medição do multímetro seja, no máximo, de 0,5%, e que esta medição seja linear na faixa de operação. Sendo assim, o teste foi satisfatório, apresentando erros em relação ao fundo de escala considerados aceitáveis. É possível notar, a partir do gráfico, que a medição se apresenta de forma linear,

pois tanto a medição com o multímetro como o valor lido pelo algoritmo possuem erros muito pequenos. Tais fatos mostram que todos os cálculos e ganhos do algoritmos estão ajustados corretamente.

6.6.2 Medição de Tensão - Divisor Resistivo

Para testar o divisor resistivo, o método foi o mesmo do teste do ADS. Diversos valores de tensão foram configurados digitalmente na fonte de bancada e, na protoboard, foi montado o divisor resistivo. Primeiro, foi realizado o teste com resistores de valores diferentes dos especificados ($R_1=1\text{M}\Omega$; $R_2=33\text{k}\Omega$), porém que apresentavam o mesmo resultado na saída (Figura 24), pois eram os que estavam acessíveis no momento.

Figura 24 – Teste do Divisor Resistivo na Protoboard



Fonte: Autor

Deve-se ressaltar que a fonte de bancada fornece até 30V, que é o valor, aproximadamente, que será fornecido pelo módulo FV. Nesse teste, os seguintes resultados foram obtidos (Tabela 4):

Valor na fonte (V)	Valor calculado (referência)	Valor medido com multímetro
20	0,600	0,583
22	0,660	0,645
24	0,721	0,700
26	0,781	0,760
28	0,841	0,820
30	0,901	0,880

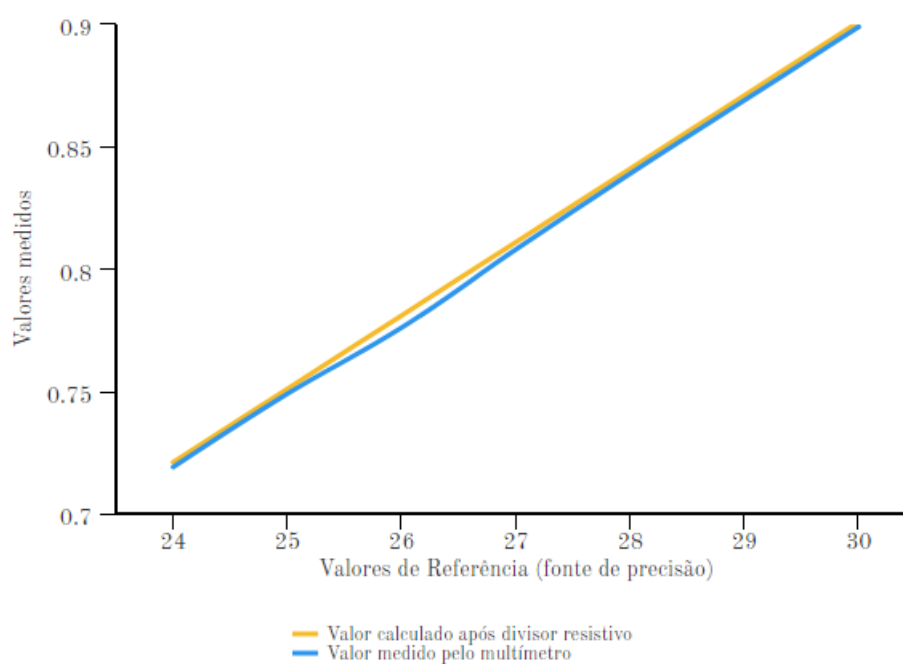
Tabela 4 – Teste Unitário do Divisor Resistivo

Depois, o teste foi feito com os resistores que foram especificados e utilizados no projeto final ($R_1=200\text{k}\Omega$; $R_2=6,19\text{k}\Omega$), e os resultados são apresentados na Tabela 5.

Valor na fonte (V)	Valor calculado (referência)	Valor medido com multímetro
24	0,721	0,719
25	0,751	0,749
26	0,781	0,776
27	0,811	0,808
28	0,841	0,839
29	0,871	0,869
30	0,901	0,889

Tabela 5 – Segundo Teste Unitário do Divisor Resistivo

Figura 25 – Teste Unitário do Divisor Resistivo na Protoboard



Fonte: Autor

6.6.3 Medição de Corrente - ACS712

Para o teste do sensor de corrente, a fonte de bancada foi configurada com os 3 canais em paralelo para que fosse possível obter 9A de alimentação (Figura 26).

Figura 26 – Configuração da fonte de bancada (na própria tela) para teste do sensor de corrente



Fonte: Autor

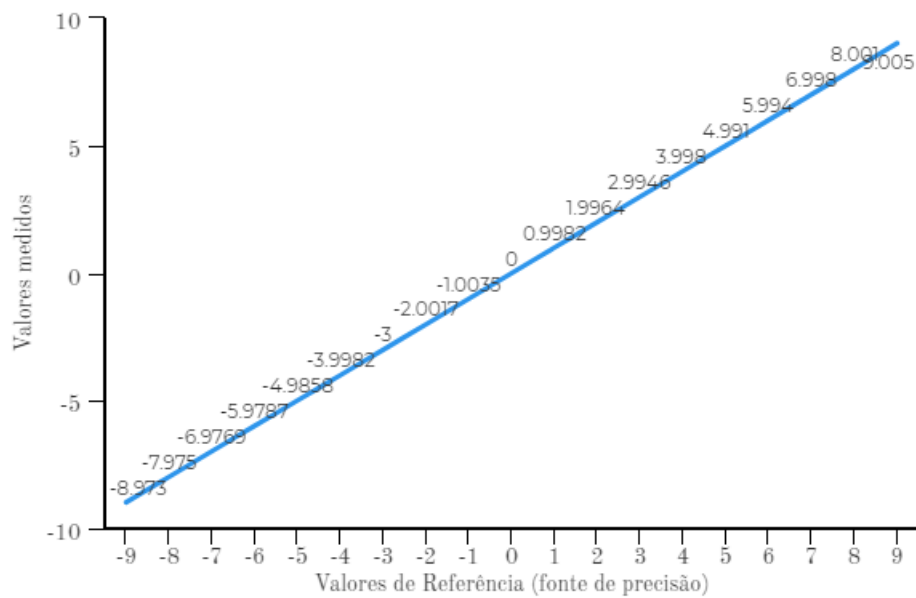
Assim, foi possível fornecer valores de corrente de -9A a 9A, e realizar a leitura, em tensão, através do ADS. Após, os resultados foram medidos com o multímetro e são apresentados conforme Tabela 6.

A Figura 27 mostra os valores medidos pelo ACS já convertidos em corrente e, de acordo com este gráfico, é possível ver que esses valores estão bem próximos aos valores reais fornecidos pela fonte. Este teste também apresentou resultados aceitáveis para o projeto.

Valor na fonte (A)	Valor medido pelo ADS em tensão
-9	0,831
-8	1,030
-7	1,210
-6	1,420
-5	1,571
-4	1,766
-3	1,965
-2	2,132
-1	2,319
0	2,501
1	2,712
2	2,867
3	3,069
4	3,266
5	3,447
6	3,651
7	3,821
8	4,009
9	4,178

Tabela 6 – Teste do Sensor de Corrente

Figura 27 – Linearização do sensor de corrente



Fonte: Autor

6.6.4 Fonte de Alimentação - Hi-Link

O teste da fonte de alimentação (Hi-Link) consistiu em, basicamente, 2 etapas: a primeira foi verificar qual o valor mínimo de tensão de entrada que a fonte necessita para ser capaz de acionar sua saída com 5VDC, tensão necessária para acionamento de todo sistema. A segunda etapa foi verificar, após acionada, se a fonte mantinha sua saída fixa em 5VDC, mesmo que o valor da tensão de entrada aumente. Esses testes são necessários pois, quando o dispositivo for conectado aos módulos FV, esses irão fornecer a tensão de entrada para a fonte e, dependendo da quantidade de células em série, essa tensão varia. Assim, para o primeiro teste, valores de tensão foram fornecidos, através da fonte de bancada, até ser verificado o acionamento de sua saída, com 5VDC: o acionamento ocorreu com um valor de 21V na entrada, energizando todo o sistema.

Para o segundo teste, a tensão de entrada foi aumentada, gradativamente, até o limite de 30V fornecidos pela fonte de bancada. E ainda, foi utilizada uma tomada da bancada como fonte para testar uma entrada de 110V. Em todos os casos a saída se manteve fixa em 5VDC (Figura 28).

Para esta fonte, também foi realizado um teste de capacidade de corrente, pois conforme mencionado anteriormente, estão sendo utilizados valores de tensão de entrada menores do que o sugerido pelo fabricante. Assim, neste teste, a placa desenvolvida foi ligada com todo o sistema funcionando e verificou-se que o valor de corrente de saída do sistema em funcionamento (por volta de 0,15A) é menor do que o valor limite especificada (0,6A).

6.6.5 Testes do Módulo de Comunicação/Controle

O teste do módulo de comunicação e controle do dispositivo foi, basicamente, alimentar a placa com o valor de tensão especificado e observar se a mesma ligou, e realizar a conexão da placa em uma rede WiFi. Ambos os testes foram bem-sucedidos.

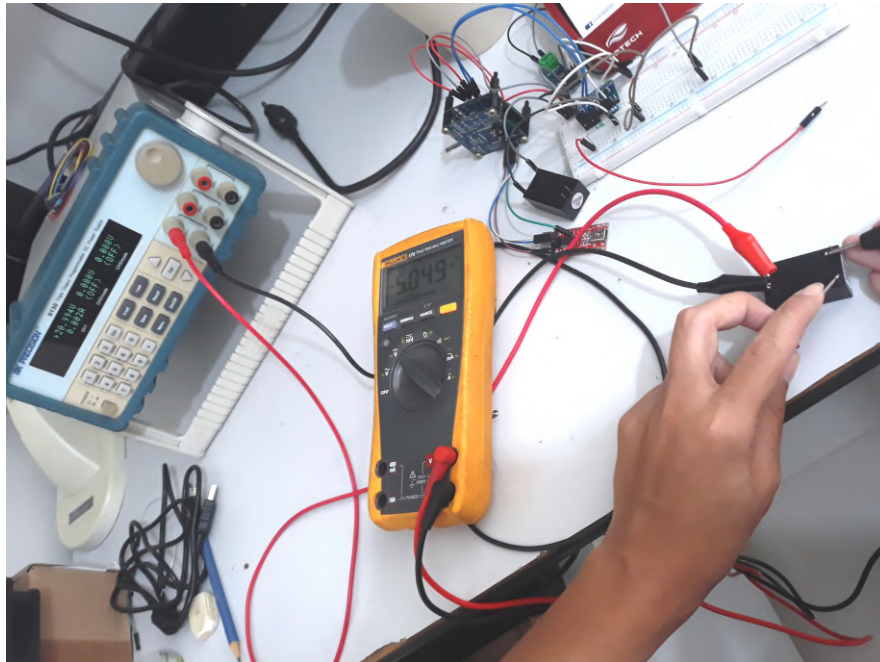
6.7 Teste do Subsistema

O teste de subsistema verifica a integração dos componentes, verificando se estes estão funcionando corretamente quando interligados. Assim, a arquitetura do sistema é validada.

6.7.1 Módulo de Comunicação e Controle

O primeiro teste realizado foi para verificar se é possível fazer a leitura, no terminal de programação, dos dados provenientes do conversor A/D a partir do módulo de comuni-

Figura 28 – Teste da fonte de alimentação Hi-Link



Fonte: Autor

ção e controle, o qual possui um barramento I2C. Assim, foi verificado que este módulo consegue fazer a aquisição desses dados sem apresentar erro.

6.7.2 Fonte de Alimentação

Este teste verificou, apenas, se a fonte de alimentação (HiLink) foi capaz de alimentar o módulo de comunicação e controle sem falhas, o qual obteve resultado satisfatório.

6.7.3 Módulo de Tensão

Este subsistema é composto pelo divisor resistivo e o conversor A/D.

Para este teste, diversos valores de tensão foram configurados na fonte de bancada e lidos através do terminal de programação. Sabendo que a fonte de bancada tem precisão de $0,03\% + 10 \text{ mV}$, considerando uma tensão de 30V , tem-se (Equação 6.3):

$$\textit{Precisão} = 30\text{V} * 0,03\% + 0,001\text{V} \quad (6.3)$$

$$\textit{Precisão} = 0,009\text{V} + 0,01\text{V}$$

$$\textit{Precisão} = 0,019\text{V} = 19\text{mV}$$

Assim, sabe-se que é possível ter uma variação de 19mV de precisão nos valores fornecidos pela fonte, fato que justificou fazer a aquisição, através do terminal de programação, de 100 valores (Figura 29) em cada ponto de tensão e calcular sua média, de modo a obter uma maior confiabilidade nos valores obtidos pelo sensor. O resultado deste teste é apresentado na Tabela 7 e na Figura 30, e foi considerado aceitável, com valores dentro do esperado e erro menor que 1%.

Figura 29 – Terminal de programação - Teste do Módulo de Tensão

```

natalia@natalia-Vostro-3560: ~/Documentos/Dissertação/Micropython
-0.6941251
-0.72
-0.727625
-0.712625
-0.7175
-0.731875
-0.6955
-0.7105
-0.7205
-0.705375
>>>
>>> for x in range(0,100):
...     read (7,0,1)*0.000125
...
...
...
-0.73675
-0.7695
-0.7505001
-0.720875
-0.765625
-0.7558751
-0.721125
-0.7815001
-0.751375
-0.7172501
-0.765125
-0.7453751
-0.723875
-0.770625
-0.757875
-0.725875
-0.7665
-0.7465
-0.7212501
-0.776875
-0.763625
-0.727375
-0.7275

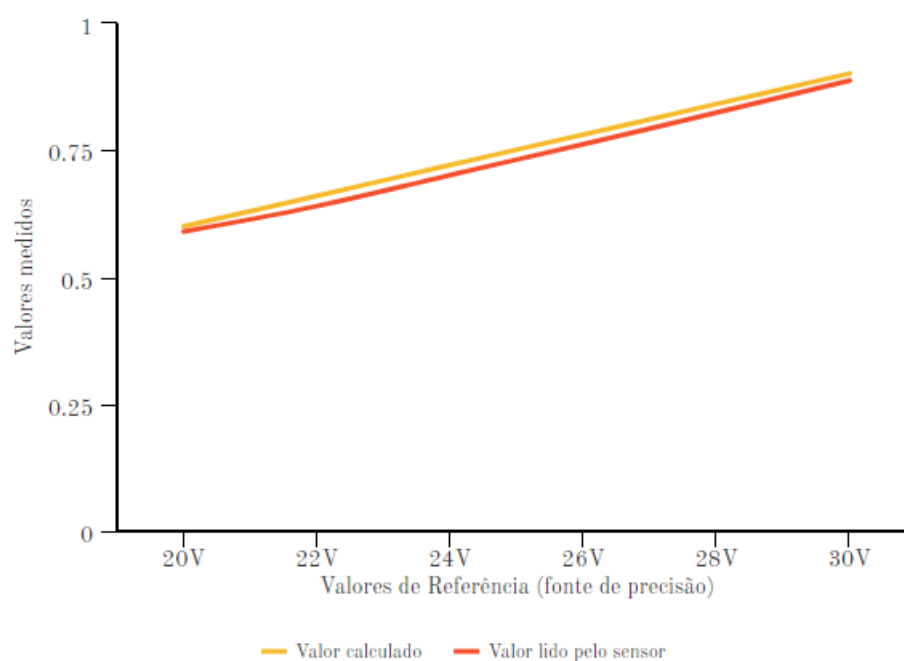
```

Fonte: Autor

Valor na fonte (V)	Valor calculado (referência)	Valor lido pelo sensor
24	0,721	0,718
25	0,751	0,747
26	0,781	0,778
27	0,811	0,806
28	0,841	0,836
29	0,871	0,866
30	0,901	0,899

Tabela 7 – Teste do Módulo de Tensão

Figura 30 – Teste do Módulo de Tensão

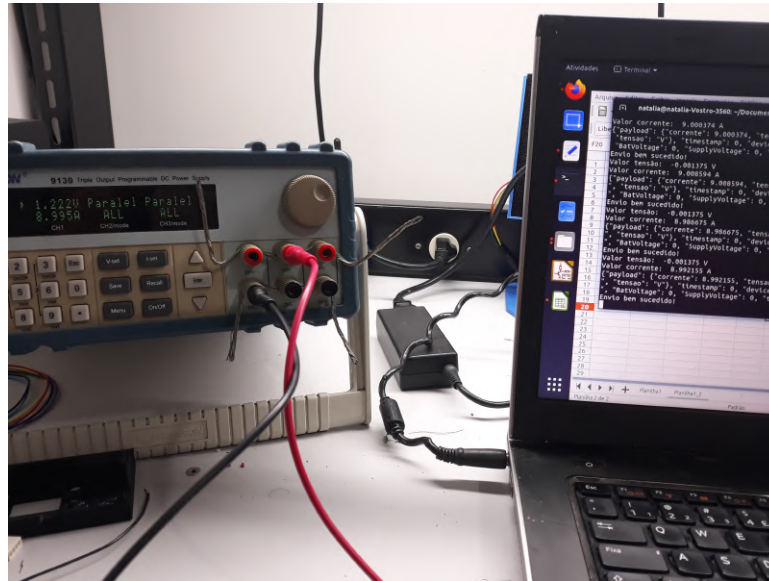


Fonte: Autor

6.7.4 Módulo de Corrente

Este subsistema é composto pelo ACS712 e o conversor A/D (ADS1115). Para o teste, a fonte de bancada foi configurada novamente com os 3 canais em paralelo para que fosse possível obter 9A de alimentação. Assim, foi possível realizar a leitura através do terminal de programação com valores já convertidos para valores de corrente (Figura 31), conforme Tabela 8.

Figura 31 – Teste do sensor de corrente



Fonte: Autor

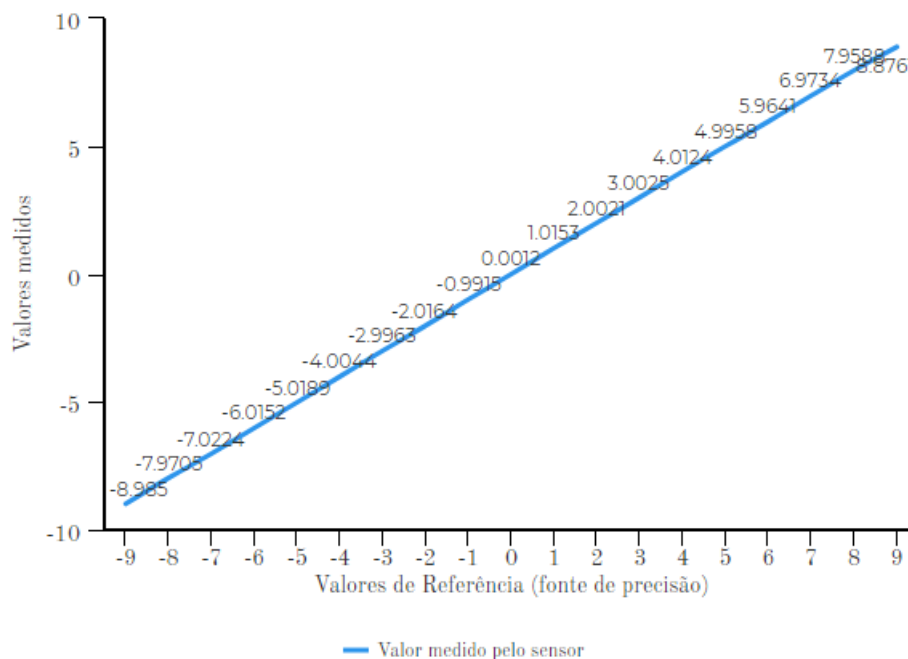
Valor na fonte (A)	Valor medido em corrente
-9	-8,985
-8	-7,970
-7	-7,022
-6	-6,015
-5	-5,018
-4	-4,004
-3	-2,996
-2	-2,016
-1	-0,991
0	0,001
1	1,015
2	2,002
3	3,002
4	4,012
5	4,995
6	5,964
7	6,973
8	7,958
9	8,876

Tabela 8 – Teste do Módulo de Corrente

A [Figura 32](#) apresenta o gráfico com os valores em corrente medidos por este módulo, e é possível ver que esses valores medidos estão bem próximos aos valores reais

fornecidos pela fonte, apresentando resultados aceitáveis para o projeto.

Figura 32 – Valores em tensão do sensor de corrente



Fonte: Autor

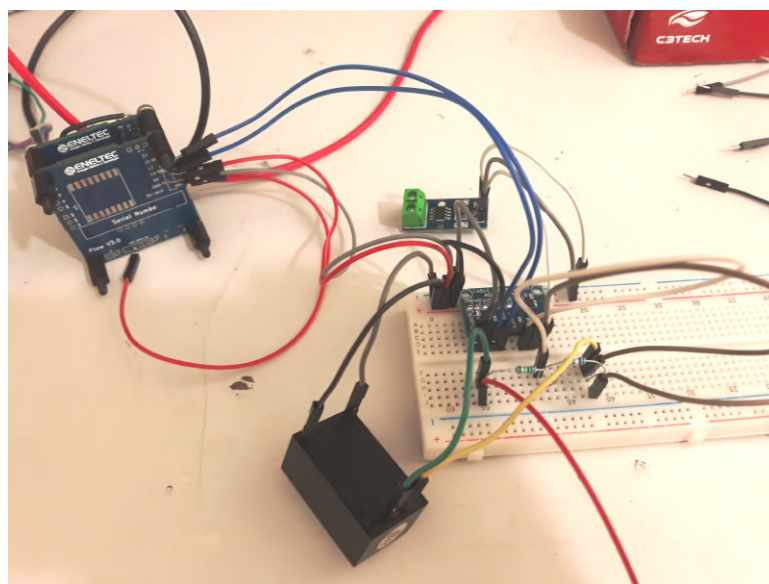
6.8 Teste do Sistema

Nesta etapa, todos os módulos (subsistemas) do dispositivo foram interligados, primeiramente, na protoboard (Figura 33), seguindo a mesma arquitetura desenvolvida na etapa da confecção da PCB, e todos esses módulos foram verificados funcionando de forma conjunta. Para isso, foi necessário utilizar os 4 canais do ADC ao mesmo tempo, sendo 2 para a leitura do módulo de tensão e 2 para a leitura do módulo de corrente.

Entre o ADS e o módulo de comunicação, foram conectados os pinos de GND, VCC, SDA e SCL, estes 2 últimos responsáveis pela comunicação. Para o módulo de tensão, a saída de tensão da fonte de bancada passa primeiro pelo divisor resistivo e depois é conectada canais 0 e 1 do ADS. Já a saída referente ao módulo de corrente passa pelo sensor de corrente (ACS712), e então seu canal de saída e o GND são conectados aos canais 2 e 3 do ADS.

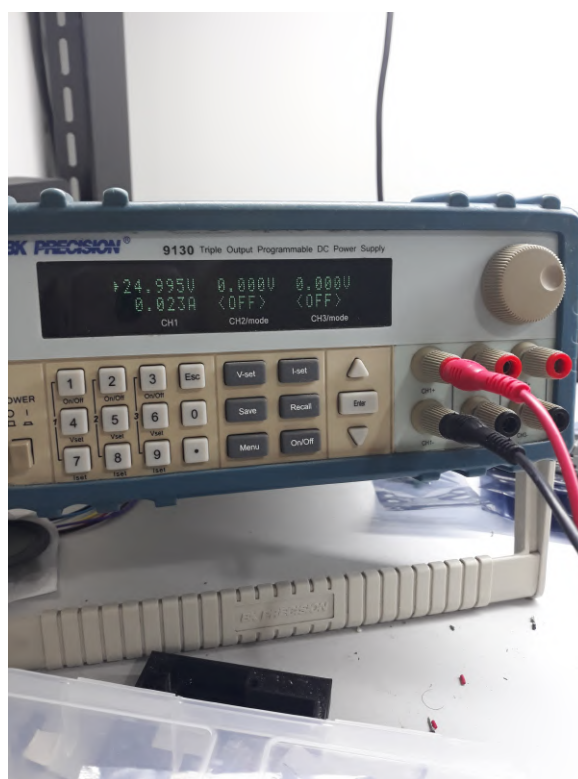
Assim como foi feito nos testes de subsistema, neste teste foram colocados valores de tensão e de corrente na fonte de bancada (Figura 34), e realizada a leitura pelo terminal de programação. A leitura de ambos os módulos foram realizadas com sucesso e, desta forma, o primeiro teste do sistema foi validado.

Figura 33 – Montagem para simulação do dispositivo na protoboard



Fonte: Autor

Figura 34 – Primeiro teste de sistema



Fonte: Autor

A partir desse ponto, a próxima etapa foi integrar e testar todos estes módulos fisicamente na PCB e simular o ambiente real de campo, conforme mostrou o tópico 6.5.1.

O segundo teste, então, consistiu na análise do sistema completo, neste caso, do protótipo do dispositivo finalizado, verificando seu funcionamento de acordo com os requisitos.

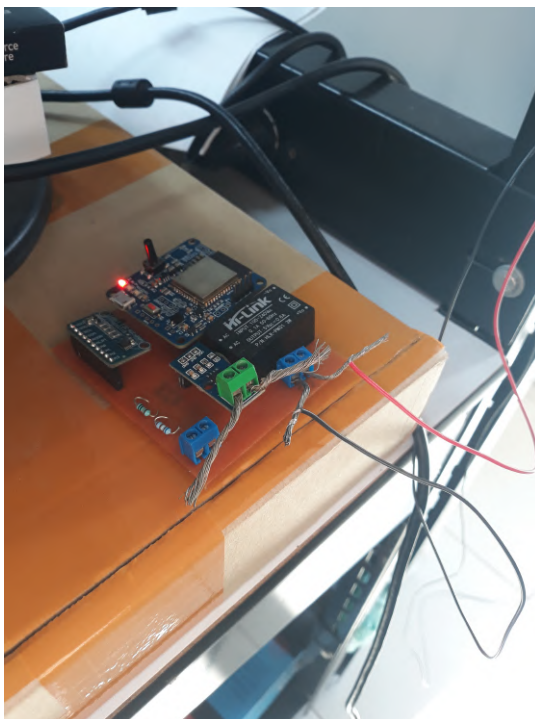
Com a placa já montada e testada em bancada, foram utilizadas mini placas solares em série para simulação do sistema real em campo (Figura 35). 5 mini placas foram conectadas em série, sendo que cada mini placa produz em torno de 6V de energia, totalizando cerca de 30V de saída. As 5 mini placas foram conectadas ao dispositivo para medição dos valores de tensão e corrente em tempo real (Figura 36), e as próprias placas alimentaram todo o sistema. Esses dados foram enviados, de forma autônoma, para o servidor MQTT, onde foi possível monitorar os valores obtidos.

Figura 35 – Mini placas solares utilizadas no teste



Fonte: Autor

Figura 36 – Conexão entre as mini placas solares e o dispositivo



Fonte: Autor

Como foi explicado no item 6.5.3, uma vez que no campo é preciso realizar o envio dos dados de forma automática, sem a necessidade de utilizar um computador ou outro dispositivo conectado fisicamente na placa para leitura dos valores, existe uma função no código de programação específica para cumprir tal requisito. Esta função faz o *login* na rede e inicia o envio de dados automaticamente. Porém, nesta etapa de testes, notou-se que pode haver a necessidade de reconfigurar a placa para que a mesma faça *login* em outra rede, caso seja utilizada em outro local ou em outra rede. Portanto, foi imprescindível retornar à etapa de Desenvolvimento de *Software* e *Hardware* para realizar tal melhoria: foi inserido um botão físico na placa que inicia o processo de reconfiguração de rede da mesma.

Nesta etapa também, notou-se que, quando energizada por um período maior de tempo, os valores de tensão adquiridos pelo módulo estavam flutuando com valores consideráveis. Após análise do ocorrido, foi concluído que os valores dos resistores utilizados no sistema (200kOhm e 6,19kOhm) estavam gerando uma microcorrente que ocasionava tal flutuação no canal do ADS. Isso ocorre devido ao fato de que os resistores dimensionados inicialmente produziam uma corrente cuja ordem de grandeza se aproxima da corrente drenada pelo circuito de amostragem do conversor A/D. Como solução, os resistores utilizados foram substituídos por novos resistores nos valores de 10kOhm e 300Ohm

(Figura 37), que proporcionam o mesmo valor de saída no divisor resistivo porém com uma carga maior, de forma que menos corrente é drenada para o ADS, interrompendo a flutuação.

Figura 37 – Novos resistores dimensionados



Fonte: Autor

6.9 Teste de Aceitação

O teste de aceitação tem a finalidade de verificar se o sistema desenvolvido cumpre seu propósito já instalado na sua área de atuação, de acordo com suas especificações atribuídas pelo usuário.

Após a realização de todos os testes de cada módulo individualmente, e o teste dos módulos integrados, tanto na *protoboard* quanto na placa final com os componentes soldados, foi realizada a montagem da PCB em sua caixa final e também as conexões com os cabos solares (Figura 38 e Figura 39), de modo que ficasse pronta para sua utilização no sistema real (campo). Esta montagem foi realizada com o diagrama definido no tópico 6.3 (Figura 40).

Figura 38 – PCB em caixa de montagem



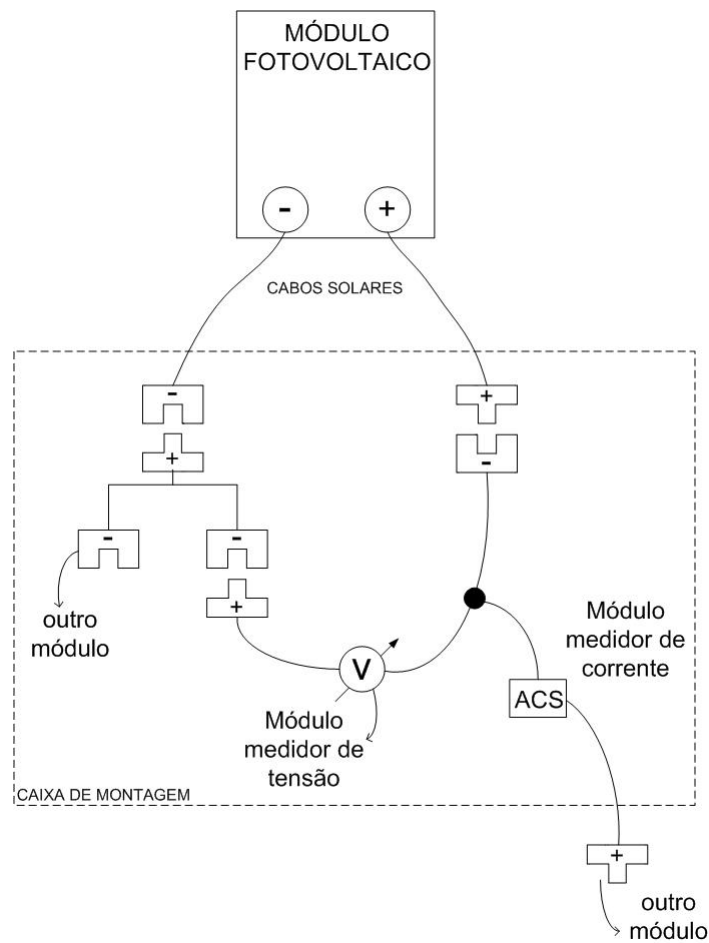
Fonte: Autor

Figura 39 – Componentes da PCB em caixa de montagem



Fonte: Autor

Com a caixa montada, antes de ser levada ao campo, foi realizado um teste com a fonte de bancada, a fim de verificar se as conexões estavam realizando o envio dos dados conforme esperado. Este teste simulou os valores que seriam fornecidos pelo sistema real, e obteve resultados satisfatórios.

Figura 40 – Esquema da ligação física do dispositivo em uma *string* fotovoltaica

Fonte: Autor

O próximo passo, então, foi realizar as conexões da caixa e o teste no sistema real. O teste final de aceitação foi realizado no Polo de Inovação de Campos dos Goytacazes, no terraço do Bloco A, onde existem módulos fotovoltaicos em série (Figura 41).

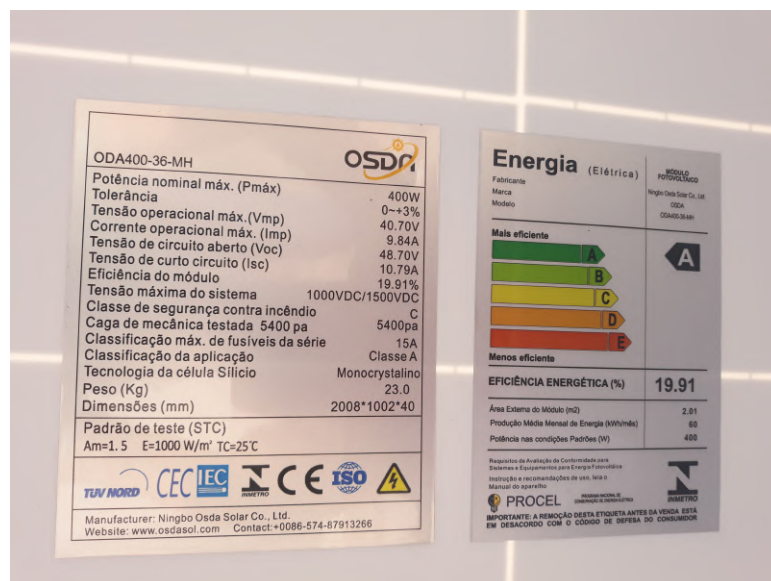
Figura 41 – Módulos fotovoltaicos no Polo de Inovação



Fonte: Autor

Antes de realizar a conexão da caixa no módulo solar, verificou-se as especificações do módulo (Figura 42) e a forma que estavam dispostos os cabos solares para conexão (Figura 43). De acordo com a especificação, o módulo fornece tensão de circuito aberto de 48,7V e tensão de operação de 40,7V. Isso significa que, quando o módulo não está em operação, ou seja, antes do inversor de frequência iniciar sua atuação, a tensão medida no módulo se mantém em torno de 48V.

Figura 42 – Especificação do módulo fotovoltaico



Fonte: Autor

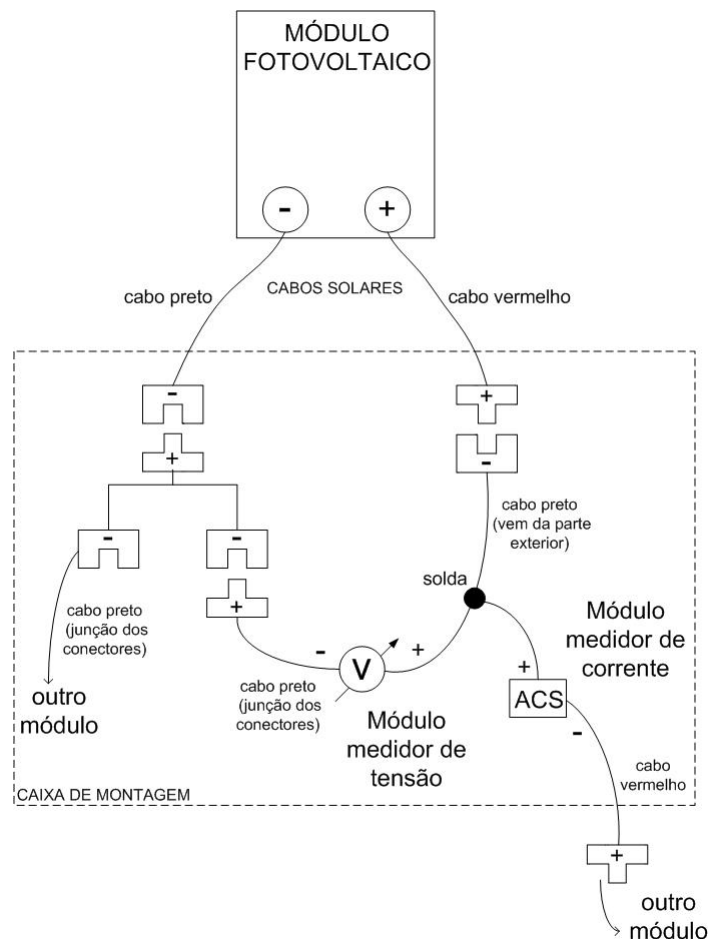
Figura 43 – Parte inferior do módulo fotovoltaico



Fonte: Autor

Sendo assim, a caixa foi conectada ao módulo de acordo com o diagrama da Figura 44, e foi iniciado o envio dos dados (Figura 45 e Figura 46). É importante ressaltar que a PCB já havia sido configurada, anteriormente, para se conectar à rede de Wi-Fi do Polo.

Figura 44 – Diagrama de montagem da caixa no módulo

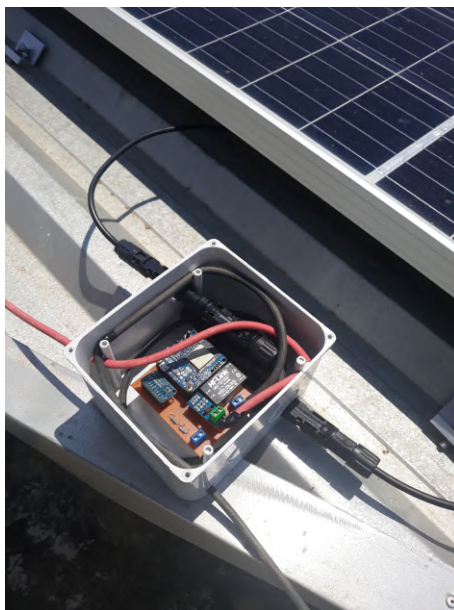


Fonte: Autor

Para ser possível monitorar os valores enviados pelo sistema para o servidor MQTT, foi utilizado o aplicativo "MQTT Explorer" (Figura 47), que apresentava, em tempo real, os dados recebidos pelo servidor provenientes do sistema em operação.

O sistema solar possui dois modos de operação: um disjuntor habilita o sistema em AC (*Alternating Current* - Corrente Alternada), e outro habilita o sistema em DC (*Direct Current* - Corrente Contínua). Quando os dois estão habilitados, os módulos funcionam normalmente, e o inversor de frequência inicia a busca pelo MPP, ou seja, ponto de operação de maior potência. Quando o AC é desabilitado, o inversor para de realizar a conversão de energia. Quando o disjuntor AC é religado, o inversor inicia as rotinas de inicialização, que dura, em média, pouco mais de um minuto. Durante este tempo, não

Figura 45 – Caixa conectada ao módulo



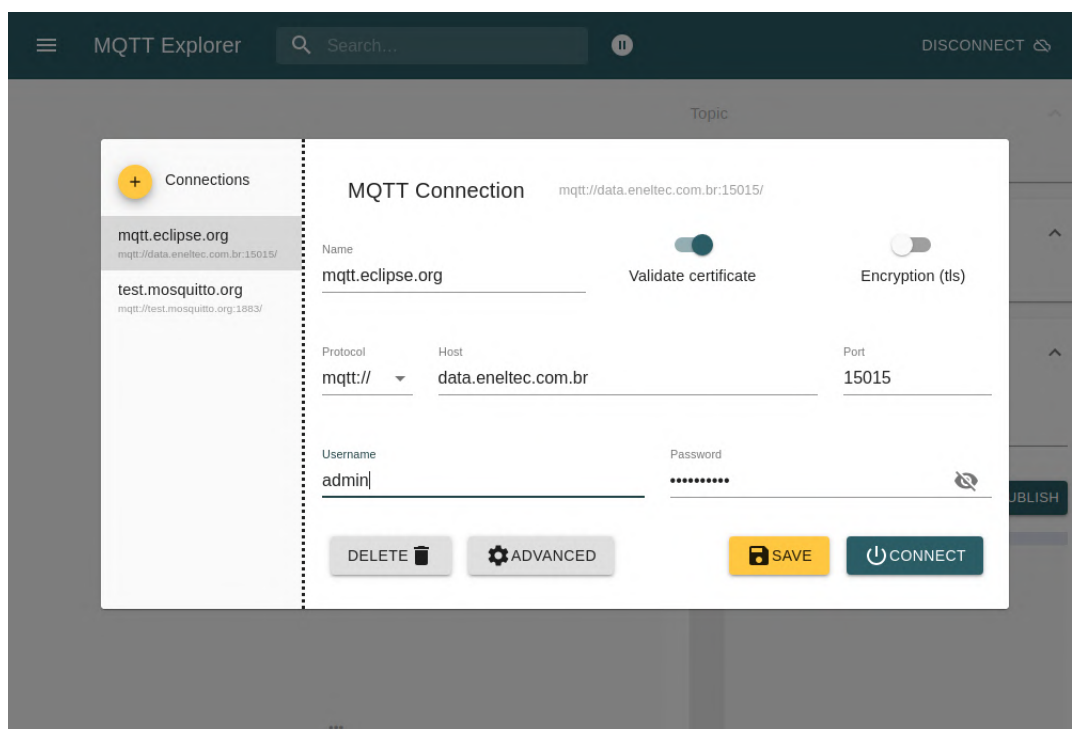
Fonte: Autor

Figura 46 – Sistema pronto para teste



Fonte: Autor

Figura 47 – Tela de inicialização do MQTT Explorer



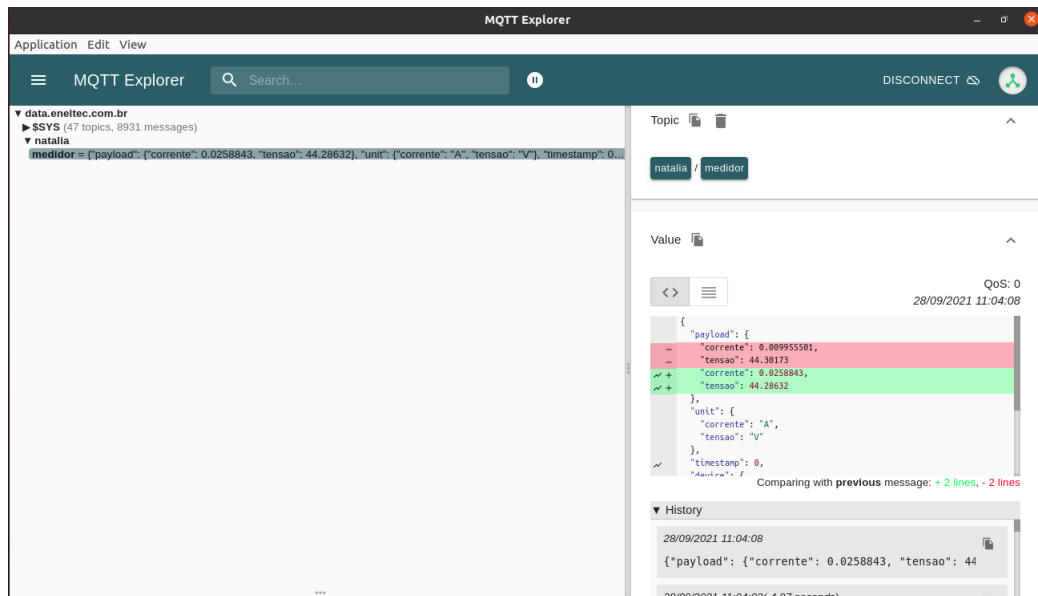
Fonte: Autor

existe conversão de energia e, portanto, não existe corrente no lado DC e a tensão lida pelo protótipo é a tensão de circuito aberto.

Para simular as condições de inicialização do inversor no início da manhã, o disjuntor AC foi desligado e religado alguns segundos depois.

Sendo assim, o primeiro teste consistiu em, apenas, verificar se os valores de tensão em circuito aberto enviados estavam de acordo com a especificação do módulo. Este valor foi medido através do sistema, e apresentou valor satisfatório, em torno de 44,3V, conforme especificação do fabricante (Figura 48).

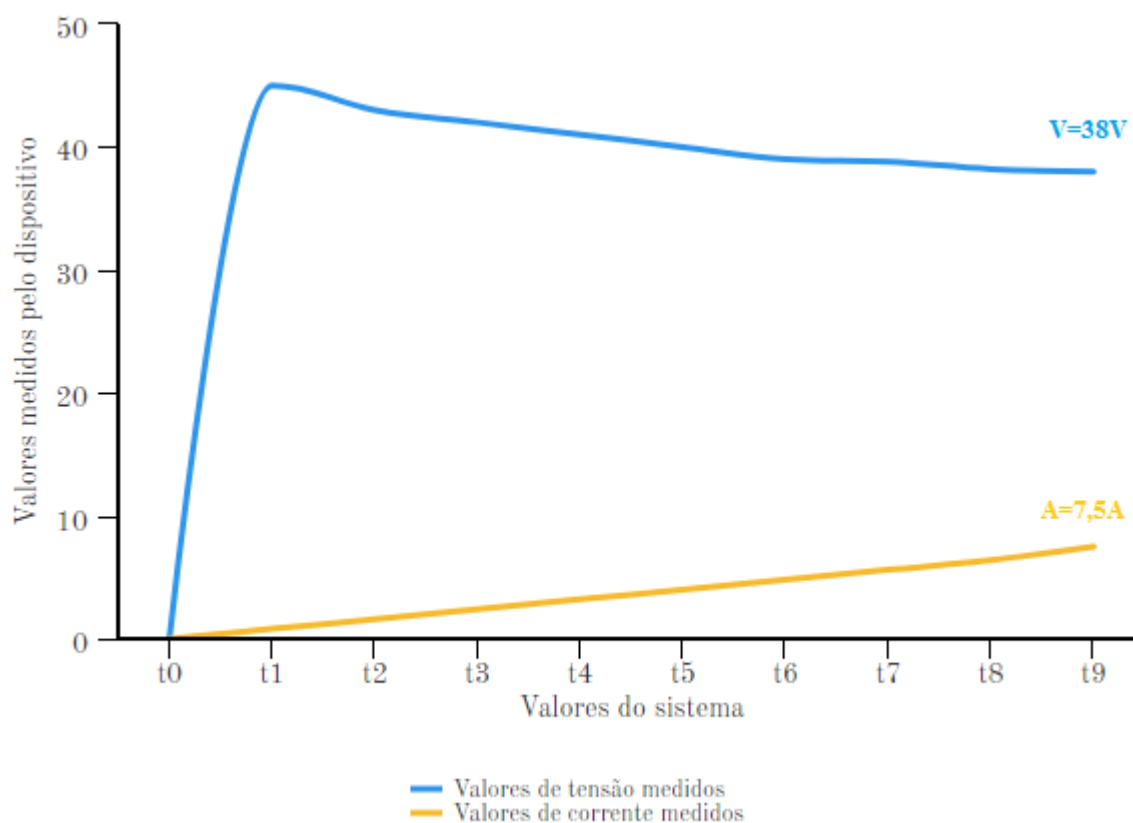
Figura 48 – Valor do teste de aceitação com circuito aberto



Fonte: Autor

Para o segundo teste, o disjuntor do AC foi acionado, e então o sistema inicializou o inversor de frequência ao detectar os raios solares no módulo. Neste momento, em teoria, os valores de tensão diminuem a medida que os valores de corrente aumentam, o que caracteriza a busca do sistema pelo MPP e a estabilização quando este é encontrado. Desta forma, a partir deste teste, foi possível observar exatamente essa diminuição nos valores de tensão medidos, e o aumento proporcional nos valores de corrente. Ao atingir a estabilidade, a tensão se manteve em torno de 38V e a corrente em torno de 7,5A (Figura 49), estando ambos os valores de acordo com as especificações de operação do fabricante.

Figura 49 – Segundo teste de aceitação



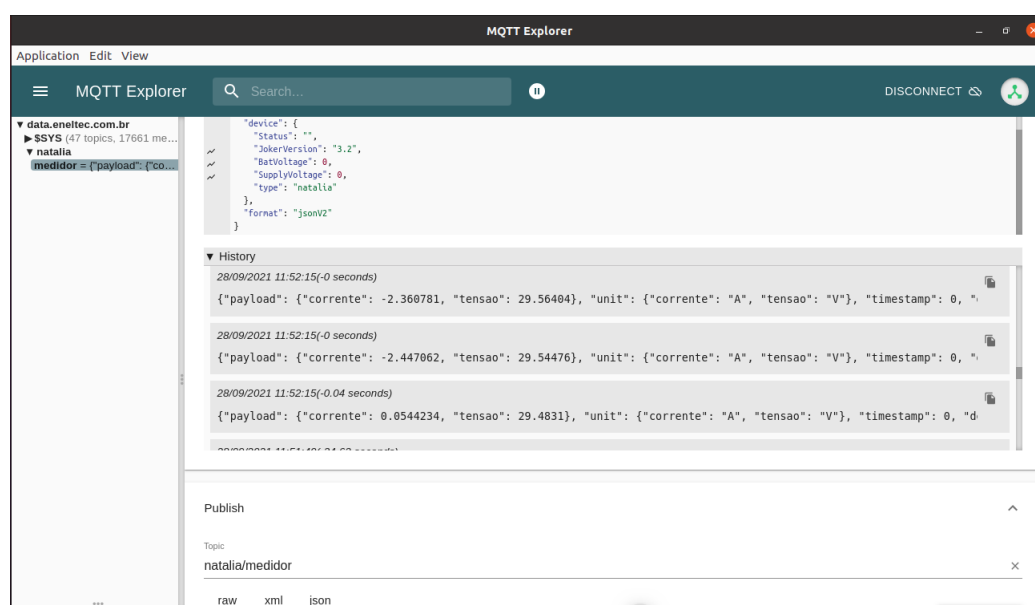
Fonte: Autor

Por último, um terceiro teste foi realizado. Neste teste, a intenção foi simular o que ocorre no amanhecer, onde os raios de sol começam a aparecer e são identificados pelas células fotovoltaicas. Para melhor entendimento deste teste, é preciso saber que os módulos fotovoltaicos são compostos por 3 conjuntos de células, e quando qualquer uma dessas células são sombreadas, ou seja, quando não há detecção da luz solar, todo esse conjunto de células no qual está inserido é desabilitado e a corrente passa por um diodo de *bypass*. Neste momento, quando em um dos conjuntos de células não há a passagem de corrente, a tensão de circuito aberto passa a ser 2/3 do especificado, ou seja, em torno dos 30V. E quando dois conjuntos de células são sombreados, a tensão fica em torno dos 15V.

Desta forma, para este último teste, foi utilizada uma cobertura de papelão para fazer sombra no módulo. No primeiro momento, fez-se sombra apenas no primeiro conjunto de células do módulo, e foi observado que o sistema permaneceu em funcionamento, e a tensão medida pelo dispositivo foi em torno de 30V, conforme esperado. Em seguida, a cobertura de papelão foi utilizada, novamente, para sombrear dois conjuntos de células no módulo. Neste momento, não foi possível fazer a leitura desse valor devido ao valor baixo de tensão no dispositivo, uma vez que o mesmo é acionado com tensão mínima de

21V. Assim, a cobertura de papelão foi retirada, de forma gradual, para que os conjuntos de células fossem iluminados novamente. Foi observado, então, o acionamento do sistema no momento em que apenas um conjunto de células estava sombreado, apresentando um valor de tensão de 30V (Figura 50) e, logo após, ao retirar toda a cobertura de papelão o dispositivo voltou a medir a tensão total do sistema, em torno dos 45V. Novamente, foi habilitado o disjuntor AC, e foi possível perceber o sistema buscando ponto de máxima potência e a consequente diminuição nos valores de tensão, e o aumento proporcional nos valores de corrente, até que fosse estabilizado.

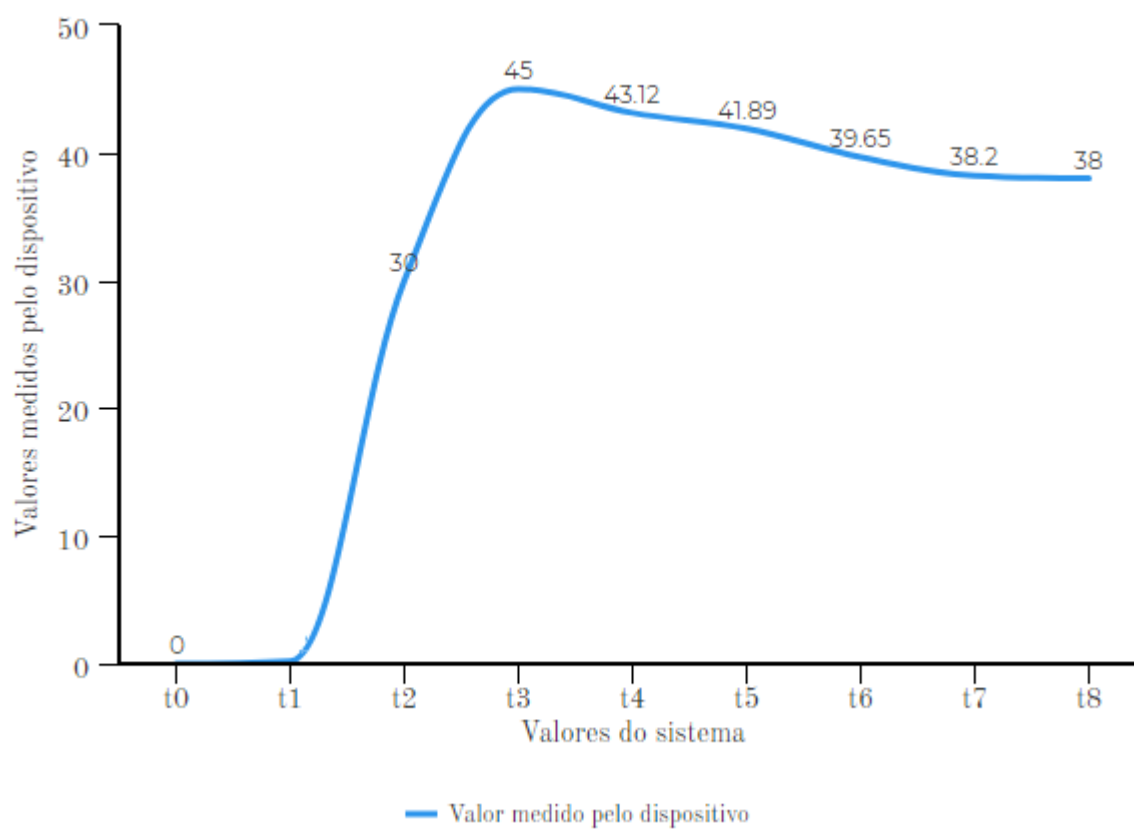
Figura 50 – Valor do teste de aceitação com sombreadamento



Fonte: Autor

Este teste pode ser melhor visualizado na Figura 51. No eixo X deste gráfico, t_0 é o momento inicial do teste, com todo módulo sombreado. Em t_1 , 2/3 do módulo é sombreado e, portanto, a tensão no módulo é, teoricamente, de 15V, porém a mesma não é percebida pelo sistema, conforme já foi explicado. T_2 é o momento em que apenas 1/3 do módulo é sombreado, apresentando no módulo uma tensão de 30V, a qual já é medida pelo sistema. Quando toda a cobertura de papelão é retirada, em t_3 , o sistema mede uma tensão de 45V, que é a tensão de circuito aberto do módulo. Neste momento, com o acionamento do disjuntor A/C, a partir de t_4 é possível observar os valores de tensão reduzindo gradativamente até estabilizar em torno dos 38V.

Figura 51 – Terceiro teste de aceitação



Fonte: Autor

Diante de todos os fatos apresentados, então, considera-se que todos os testes de aceitação realizados foram bem-sucedidos.

7 CONCLUSÕES

O presente trabalho denotou o projeto e a prototipação da PCB de um protótipo de dispositivo de monitoramento de tensão e corrente para ser utilizado em módulos fotovoltaicos, contando com a aquisição desses dados provenientes dos módulos, envio dos dados via rede sem fio para servidor MQTT e alimentação do sistema pelo próprio módulo fotovoltaico. Sabe-se que uma diminuição nos valores de tensão fornecidos por determinados módulos numa *string* fotovoltaica é um indício da ocorrência do efeito PID. Assim, este dispositivo visa possibilitar a detecção de degradação por este efeito nos módulos a partir do monitoramento desses valores de corrente e tensão, sendo uma ferramenta de apoio para a indústria fotovoltaica.

A utilização da metodologia do modelo V foi essencial para a organização e desenvolvimento deste trabalho, desde o entendimento e exploração do problema de pesquisa, a idealização do produto e seus requisitos, até a prototipação da PCB do dispositivo e a execução de testes para verificar o funcionamento de cada parte desenvolvida.

O protótipo desenvolvido apresentou boa precisão nos valores medidos tanto nos testes em bancada com a *protoboard* quanto no teste com as mini placas solares, simulando a situação real, com medições compatíveis com a fonte de alimentação de bancada e com as medições realizadas com o multímetro. Vale ressaltar que a medição da corrente é opcional para a detecção do efeito PID e que, para baixos valores de tensão, o sistema não funciona, conforme foi visto na fase de testes. A partir do aumento nos valores de tensão nos módulos, a partir de 21V o sistema é inicializado, fazendo o envio dos dados.

O sistema apresentou bom desempenho nos testes de campo em condições simuladas de uma operação normal. Sendo assim, os objetivos deste trabalho foram alcançados com sucesso, resultando na prototipação de um dispositivo remoto de monitoramento de tensão e corrente, a partir da PCB desenvolvida. Este dispositivo é capaz de se comunicar com um servidor sem o uso de fios, permitindo o envio contínuo das medições realizadas para posterior análise por especialistas.

Para o aperfeiçoamento do projeto, propõe-se como trabalhos futuros: a realização de testes de longa duração no campo, que não foram feitos neste trabalho; a replicação deste protótipo para serem testados em módulos em funcionamento em pontos distintos de um sistema fotovoltaico; a introdução da funcionalidade de medição de temperatura do módulo, conforme mencionado no decorrer do trabalho; e a verificação de quanto a redução de eficiência nos módulos afetados pelo efeito PID se traduz em perda financeira, uma vez que a produção de energia diminui e, assim, é possível realizar a avaliação econômica do sistema de medição proposto.

REFERÊNCIAS

- ASSUNCAO, H. D. *DEGRADAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILICIO CRISTALINO INSTALADOS NO DEE - UFC*. Graduação, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 15, 85, 89 e 93.
- BAUER, J. et al. On the mechanism of potential-induced degradation in crystalline silicon solar cells. v. 6, n. 8, p. 331–333, 2012. ISSN 18626254. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/pssr.201206276>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 25.
- BERGHOLD, J. et al. Potential induced degradation of solar cells and panels. v. 6-10 September 2010, p. 7 pages, 4755 kb, 2010. Artwork Size: 7 pages, 4755 kb Medium: application/pdf Publisher: WIP-Munich. Disponível em: <<http://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?paper=8622>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 24.
- BORGES, L. d. M. *Dimensionamento e gestão de energia solar fotovoltaica para aplicação em sistemas automatizados isolados da rede elétrica*. Mestrado, 2013. Accepted: 2016-04-24T01:49:45Z Publisher: Universidade Federal de Juiz de Fora. Disponível em: <<https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/948>>. Citado 3 vezes nas páginas 15, 87 e 88.
- BRITO, M. C.; SILVA, J. A. Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade. p. 7, 2006. Citado na página 88.
- CAMARA, H. V. B.; MIRANDA, H. F. B.; SILVA, J. V. da. Recovery of modules affected by potential induced degradation (PID) applying a reverse potential in the laboratory without temperature control. In: *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*. IEEE, 2019. p. 1–5. ISBN 978-1-5386-9567-8. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8895289/>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 21.
- CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. Modelo de arranjo fotovoltaico destinado a análises em eletrônica de potência via simulação. v. 13, n. 3, p. 141–146, 2008. ISSN 14148862, 1984557X. Disponível em: <<https://sobraep.org.br/artigo/modelo-de-arranjo-fotovoltaico-destinado-a-analises-em-eletronica-de-potencia-via-simulacao/>>. Citado 2 vezes nas páginas 92 e 93.
- CHAPIN, D. M.; FULLER, C. S.; PEARSON, G. L. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. v. 25, p. 676–677, 1954. ISSN 0021-8979. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/1954JAP....25..676C>>. Citado na página 88.
- CUETO, J. A. D.; RUMMEL, S. R. Degradation of photovoltaic modules under high voltage stress in the field. In: *Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems III*. International Society for Optics and Photonics, 2010. v. 7773, p. 77730J. Disponível em: <<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/7773/77730J/Degradation-of-photovoltaic-modules-under-high-voltage-stress-in-the/10.1117/12.861226.short>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 24.

DAOREN, G. et al. Research on potential induced degradation (PID) of PV modules in different typical climate regions. v. 330, p. 012041, 2018. ISSN 1757-8981, 1757-899X. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1757-899X/330/i=1/a=012041?key=crossref.f7426052ed13aa219367d2b269884a29>>. Citado na página 20.

ELLABBAN, O.; ABU-RUB, H.; BLAABJERG, F. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. v. 39, p. 748–764, 2014. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114005656>>. Citado na página 84.

EPE, E. d. P. E. Relatório Síntese BEN 2019, *Balanco Energético Nacional 2019*. 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Citado na página 85.

FIGUEIREDO, G.; ZILLES, R. DEGRADAÇÃO INDUZIDA PELO POTENCIAL EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS. p. 11, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 15, 24, 25 e 26.

FILHO, P.; FIGUEIREDO, G. *Degradação induzida pelo potencial em módulos e instalações fotovoltaicas de c-Si*. text, 2017. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-21122017-110248/>>. Citado 5 vezes nas páginas 15, 20, 24, 25 e 94.

FORSBERG, K.; MOOZ, H. The relationship of systems engineering to the project cycle. v. 4, n. 3, p. 36–43, 1992. ISSN 1042-9247. Publisher: Taylor & Francis _eprint: <https://doi.org/10.1080/10429247.1992.11414684>. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10429247.1992.11414684>>. Citado na página 29.

GASPARIN, F. P. Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos. 2009. Accepted: 2009-05-08T04:12:50Z. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/15729>>. Citado 2 vezes nas páginas 90 e 91.

GIZ; SENAI. *Especialista Técnico em Energia Solar Fotovoltaico*. 2018. Citado na página 89.

GLOBAL SOLAR ATLAS. *Global Solar Atlas*. 2017. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/map>>. Citado na página 86.

HACKE, P. et al. System voltage potential-induced degradation mechanisms in PV modules and methods for test. In: *2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. IEEE, 2011. p. 000814–000820. ISBN 978-1-4244-9965-6 978-1-4244-9966-3 978-1-4244-9964-9. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6186079/>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 24.

HOFFMAN, A. R.; ROSS, R. G. Environmental qualification testing of terrestrial solar cell modules. In: *Proceedings of the 13th IEEE Photovoltaic Specialist Conference*. [S.l.: s.n.], 1978. p. 835–842. Citado na página 24.

HOFFMANN, S.; KOEHL, M. Effect of humidity and temperature on the potential-induced degradation: Effect of humidity and temperature on the PID. v. 22, n. 2, p. 173–179, 2014. ISSN 10627995. Publisher: John Wiley & Sons, Ltd. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/pip.2238>>. Citado na página 20.

HYLSKY, J. et al. Design of p-type photovoltaic cells resistant to potential-induced degradation. v. 8, n. 5, p. 1215–1221, 2018. ISSN 2156-3381, 2156-3403. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8388711/>>. Citado na página 21.

HYLSKY, J.; STRACHALA, D.; VAN K, J. Temperature influence on the PID affected photovoltaic modules regeneration. v. 74, n. 1, p. 277–283, 2016. ISSN 1938-6737, 1938-5862. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1149/07401.0277ecst>>. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 28.

IEA. *World energy balances and statistics – Data services*. 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/world-energy-balances-and-statistics>>. Citado na página 84.

JR., J. U. *Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: Sua Influência na Qualidade da Energia elétrica e Análise dos Parâmetros que Possam Afetar a Conectividade*. Pós Graduação, 2010. Citado na página 87.

LAUSCH, D. et al. Sodium outdiffusion from stacking faults as root cause for the recovery process of potential-induced degradation (PID). v. 55, p. 486–493, 2014. ISSN 1876-6102. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214012375>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

LEITE, D. S. *Degradação Induzida pelo Potencial (PID) em Módulos Fotovoltaicos*. Mestrado, 2012. Citado 7 vezes nas páginas 15, 20, 87, 88, 89, 90 e 91.

LUNA, M. L. M. *Desenvolvimento e validação de traçador de curva $I \times V$ para módulos fotovoltaicos*. Mestrado, 2016. Accepted: 2016-07-12T15:10:04Z. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/18268>>. Citado 5 vezes nas páginas 15, 85, 88, 92 e 93.

LUO, W. et al. Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review. v. 10, n. 1, p. 43–68, 2017. ISSN 1754-5692, 1754-5706. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=C6EE02271E>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 24.

MARTÍNEZ-MORENO, F.; FIGUEIREDO, G.; LORENZO, E. In-the-field PID related experiences. v. 174, p. 485–493, 2018. ISSN 09270248. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024817305263>>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

MARTÍNEZ-MORENO, F. et al. On-site tests for the detection of potential induced degradation in modules. In: . [S.l.: s.n.], 2013. p. 5. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 27.

MASUDA, A.; HARA, Y.; JONAI, S. Consideration on the diffusion and recovery phenomena in potential-induced degradation for crystalline silicon photovoltaic modules. v. 55, n. 2, p. 02BF10, 2016. ISSN 0021-4922, 1347-4065. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1347-4065/55/i=2S/a=02BF10?key=crossref.12aab44a3bde4742c4101aa8a954941e>>. Citado na página 21.

NASCIMENTO, C. A. *Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica*. Pós Graduação Lato-Sensu, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 88 e 89.

- NAUMANN, V. et al. Micro structural root cause analysis of potential induced degradation in c-si solar cells. v. 27, p. 1–6, 2012. ISSN 1876-6102. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610212012337>>. Citado na página 20.
- NAUMANN, V. et al. Explanation of potential-induced degradation of the shunting type by the decoration of stacking faults in si solar cells. v. 120, p. 383–389, 2014. ISSN 09270248. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024813003000>>. Citado na página 20.
- OVANDO, E. et al. Possibilities of regeneration of a PID degraded PV cell. v. 87, n. 1, p. 237–243, 2018. ISSN 1938-6737, 1938-5862. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1149/08701.0237ecst>>. Citado na página 27.
- PEARSALL, N. M.; HILL, R. Photovoltaic modules, systems and applications. p. 42, 2001. Citado na página 92.
- PINGEL, S. et al. Potential induced degradation of solar cells and panels. In: *2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. IEEE, 2010. p. 002817–002822. ISBN 978-1-4244-5890-5. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5616823/>>. Citado 5 vezes nas páginas 15, 20, 25, 26 e 27.
- PINGEL, S.; JANKE, S.; FRANK, O. Recovery methods for modules affected by potential induced degradation (PID). p. 5 pages, 5325 kb, 2012. Artwork Size: 5 pages, 5325 kb Medium: application/pdf Publisher: WIP. Disponível em: <<http://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?paper=15315>>. Citado na página 27.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. [S.l.]: Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES, CEPEL - CRESESEB, 2014. Citado 7 vezes nas páginas 15, 85, 87, 88, 89, 90 e 91.
- PRIEB, C. W. M. *Desenvolvimento de um sistema de ensaio de módulos fotovoltaicos*. Mestrado - Programa de pós-graduação em engenharia mecânica., 2002. Citado na página 90.
- REIS, P. *Como funcionam as células solares fotovoltaicas*. 2015. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/como-funcionam-celulas-solares-componentes-operacoes/>>. Citado na página 87.
- RÜTHER, R. *Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil*. 1a ed. ed. [S.l.]: Editora UFSC : Laboratório de Energia Solar, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. ISBN 978-85-87583-04-8. Citado na página 89.
- SAGA, T. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. v. 2, n. 3, p. 96–102, 2010. ISSN 1884-4057. Number: 3 Publisher: Nature Publishing Group. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/am201082>>. Citado na página 89.
- SEBRAE. *Cadeia de valor da energia solar fotovoltaica no Brasil*. 2017. 362 p. Citado 4 vezes nas páginas 85, 89, 90 e 91.

- SHAMIEH, C. *Engenharia de Sistemas Para Leigos, IBM Edição Limitada*. [S.l.]: Wiley Publishing, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 31.
- SWANSON, R. et al. The surface polarization effect in high-efficiency silicon solar cells. In: *15th PVSEC*. [S.l.]: Shanghai, China, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 20, 24 e 25.
- UNEP. *Renewables 2019 Global Status Report*. 2019. Section: publications. Disponível em: <<http://www.unenvironment.org/resources/report/renewables-2019-global-status-report>>. Citado na página 84.
- VIANA, T. D. S. *Potencial de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos com concentrador no Brasil*. Doutorado em Engenharia Civil, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 87 e 91.
- VIDGU TECHNOLOGIES. *Vidgu Technologies PID Solutions*. 2018. Disponível em: <www.vidgu.com>. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; FILHO, E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. v. 24, n. 5, p. 1198–1208, 2009. ISSN 1941-0107. Conference Name: IEEE Transactions on Power Electronics. Citado na página 88.

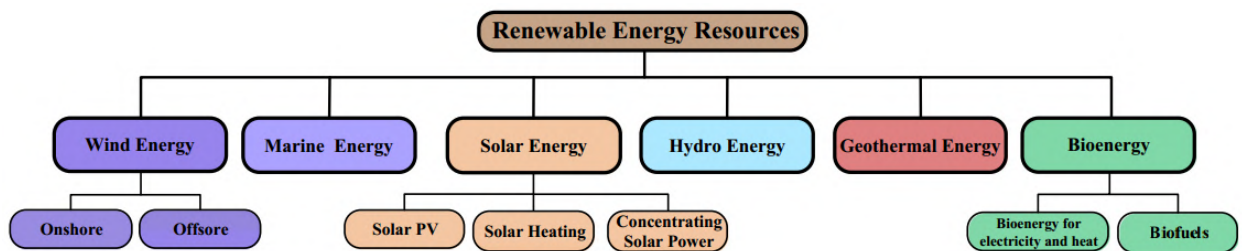
Apêndices

APÊNDICE A – MATERIAL DE APOIO

A.1 Energias Renováveis

Energias renováveis são caracterizadas por serem continuamente reabastecidas pela natureza e são derivadas de recursos naturais, como o sol, o vento e as marés, posteriormente transformadas em eletricidade, calor e combustíveis. Essas energias podem ser divididas em energia solar, eólica, maremotriz, hidroelétrica, geotérmica e bioenergia (biomassa), conforme [Figura 52](#). As tecnologias inseridas nessas formas de produção de energia crescem e evoluem constantemente, o que contribui para a redução de custos e o incentivo de sua utilização ([ELLABBAN; ABU-RUB; BLAABJERG, 2014](#)).

Figura 52 – Fontes de Energias Renováveis



Fonte: ([ELLABBAN; ABU-RUB; BLAABJERG, 2014](#))

As energias solar, eólica e hidroelétrica são provenientes, respectivamente, da luz do Sol, da ação do vento e do movimento das águas através de turbinas. A biomassa é originada das plantas e árvores através do armazenamento de energia pela fotossíntese. Energia geotérmica é a energia do interior da Terra, armazenada em rochas, água quente e vapores. Por fim, energia maremotriz é a energia obtida através do movimento das ondas e das marés ([ELLABBAN; ABU-RUB; BLAABJERG, 2014](#)).

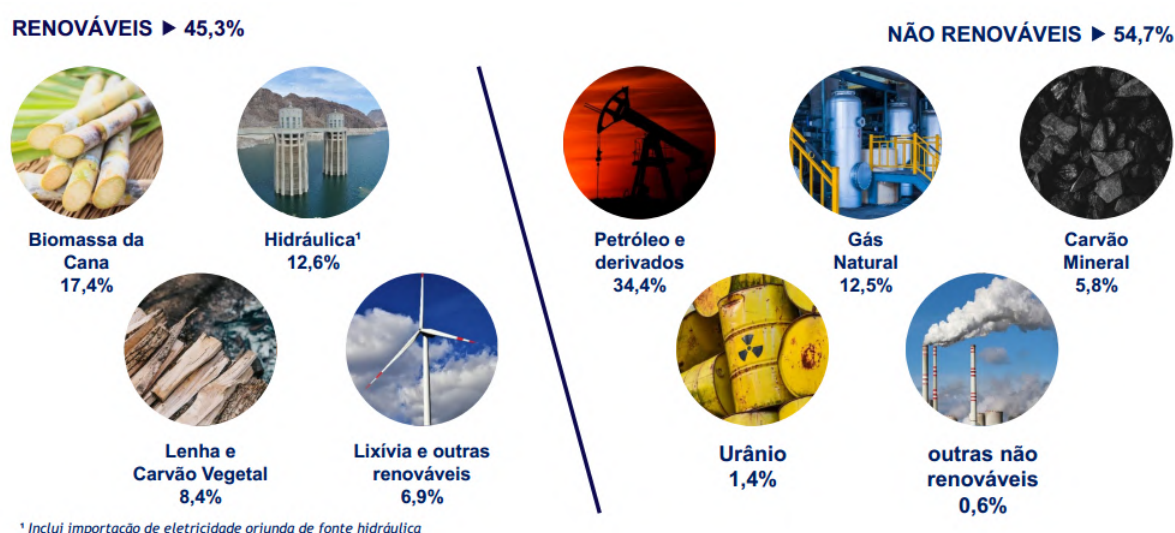
A produção de energia através de fontes renováveis já é estabelecida em escala global, com um número crescente de países que produzem pelo menos 20% de sua energia a partir de fontes renováveis. Até 2018, pelo menos 90 países atingiram o mínimo de 1GW de capacidade de geração, e pelo menos 30 países ultrapassaram 10GW. A bioenergia, a energia solar e a eólica ganham destaque em seu desenvolvimento ([UNEP, 2019](#)).

Dados do Balanço Energético Global de 2019 ([IEA, 2019](#)) apontam que a matriz energética mundial é composta, principalmente, por fontes não renováveis. Petróleo e derivados correspondem a 32% da produção total, seguido pelo carvão (27%) e o gás

natural (22%). Já as fontes renováveis correspondem a apenas cerca de 14% da matriz, sendo 10% correspondente ao biocombustível, 2% às hidrelétricas e 2% à outros tipos de energia, como solar e eólica. Apesar de baixos, esses valores têm aumentado ao longo dos anos.

No Brasil, as fontes de energia não-renováveis também predominam na composição da matriz energética brasileira, sendo responsáveis por 54,7%, divididas entre petróleo e derivados (34,4%), carvão mineral (5,8%), gás natural (12,5%) e outros. Porém, a produção através de fontes renováveis é maior que no resto do mundo, correspondendo a 45,3% da matriz nacional. Cerca de 12,6% é proveniente das hidrelétricas, 17,4% da biomassa e 15,6% de outras fontes renováveis (Figura 53) (EPE, 2019).

Figura 53 – Oferta Interna de Energia - Brasil



Fonte: (EPE, 2019)

A.1.1 Energia Solar

O Sol é fonte primária de energia, e a irradiância solar que atinge a camada atmosférica da Terra é suficiente para suprir o consumo energético anual global em aproximadamente 2 horas (PINHO; GALDINO, 2014).

A energia originada da luz solar é chamada de energia solar fotovoltaica, e o fenômeno físico que promove a conversão da energia luminosa proveniente do Sol em energia elétrica é denominado Efeito Fotovoltaico (FV) (ASSUNCAO, 2014; LUNA, 2016).

Projeções estimam que a matriz elétrica global será composta por 25% de energia solar até 2040, podendo se tornar a maior fonte de energia a nível global, consolidando-a como uma importante fonte alternativa de energia limpa e sustentável (SEBRAE, 2017).

O território brasileiro possui um grande potencial de produção de energia solar devido à sua localização, extensão territorial e clima favorável. O mapa da Figura 54 mostra que o Brasil apresenta um elevado índice de potencial fotovoltaico, chegando a até 4,8kwh/kwp por dia em algumas regiões. Contudo, de acordo com dados da (EPE, 2019), este tipo de produção correspondeu a apenas aproximadamente 0,5% da matriz elétrica brasileira em 2018.

Figura 54 – Índice de Potencial Fotovoltaico do Brasil



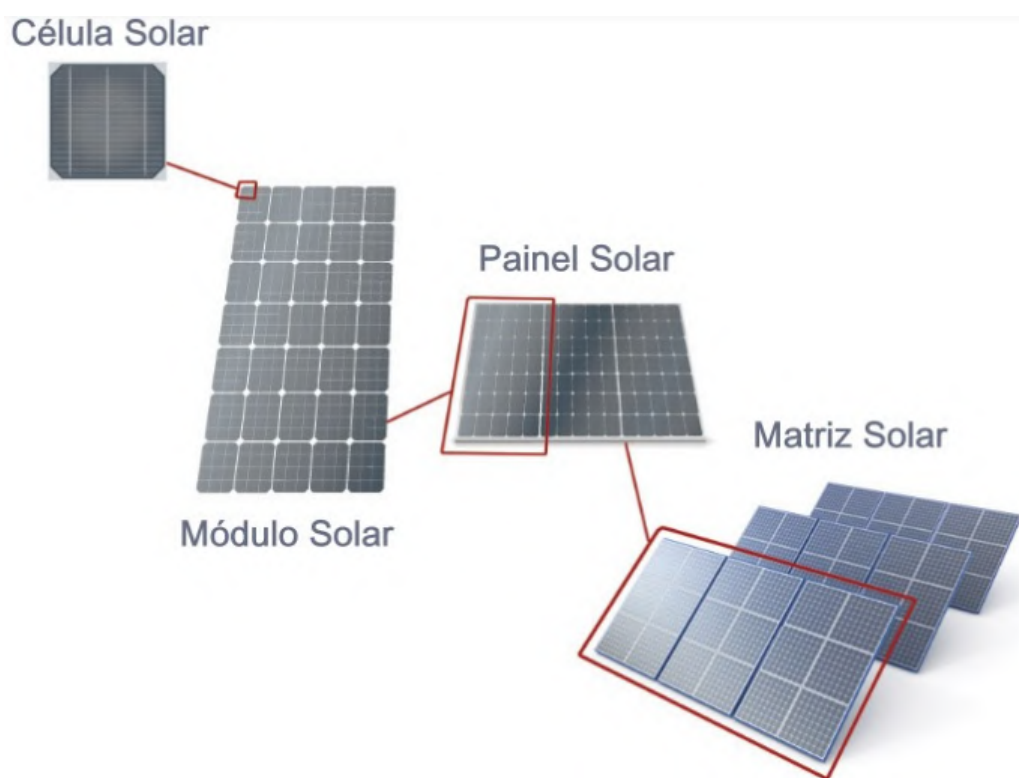
Fonte: (GLOBAL SOLAR ATLAS, 2017)

A.2 Placas Solares

Os sistemas de energia solar possuem algumas diferenças em suas nomenclaturas e definições, que são importantes para um melhor entendimento desses sistemas em um contexto geral (55. As células solares são construídas com material semicondutor, a fim de realizarem o efeito fotovoltaico; os módulos são associações de células solares, geralmente conectadas eletricamente em série; os painéis são um conjunto de módulos conectados; e sistema é um conjunto de painéis conectados a um inversor, que é responsável pela conversão da energia (LEITE, 2012; JR., 2010).

Essas diferentes associações elétricas, em série ou em paralelo, são definidas de modo a aumentar os níveis de tensão e corrente do sistema solar, de acordo com a energia requerida na aplicação (BORGES, 2013; PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 55 – Nomenclaturas de Placas Fotovoltaicas



Fonte: (REIS, 2015)

A principal especificação dos módulos FV é sua potência nominal, ou potência de saída, e para se obter os níveis de tensão e corrente desejados, esses módulos podem ser compostos por um conjunto de 36, 72 ou até 216 células fotovoltaicas (PINHO; GALDINO, 2014; VIANA, 2010).

A.2.1 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez pelo físico francês Edmond Becquerel, em 1839, que realizou um experimento utilizando um eletrodo sólido inserido em uma solução eletrolítica, e quando exposto à luz solar produziu uma corrente elétrica (BRITO; SILVA, 2006).

Em 1954, nos EUA, Chapin, Fuller e Pearson (1954) realizaram um estudo sobre células solares de silício e foi desenvolvida a primeira bateria solar, que convertiam cerca de 6% da radiação solar em energia.

No interior das células solares, a junção P-N é composta por duas camadas, uma com um dopante P e a outra com um dopante N: o dopante P é definido como um “aceitador de elétrons”, ou seja, existe um déficit de elétrons nessa camada; e o dopante N é definido como um “doador de elétrons”, pois existe um excesso de elétrons (LEITE, 2012; VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009).

No momento em que as camadas são unidas, os elétrons em excesso da camada N migram e ocupam as lacunas da camada P, dando origem a um campo elétrico. Portanto, a camada N se torna eletricamente positiva (com falta de elétrons) e a camada P se torna eletricamente negativa (com excesso de elétrons) (LUNA, 2016).

Por fim, quando a junção P-N é exposta à fótons de luz solar com energia superior que o gap de energia, ocorre a geração de pares elétron-lacuna, acelerando as cargas e dando origem à uma corrente através da junção. O deslocamento dessas cargas promove, então, uma diferença de potencial, que é justamente o efeito fotovoltaico (BORGES, 2013; PINHO; GALDINO, 2014). A intensidade da corrente gerada é de acordo com a intensidade de luz solar incidente na junção (NASCIMENTO, 2004).

A.2.2 Células Fotovoltaicas

Células solares são o principal componente de um sistema de energia solar, responsável por realizar o efeito fotovoltaico, e são fabricadas com materiais semicondutores, ou seja, não são condutores e nem isolantes. Estas células são similares a um diodo semicondutor, e possuem uma junção P-N conectada, e uma fina camada metálica que será exposta à luz (NASCIMENTO, 2004; VILLALVA; GAZOLI; FILHO, 2009).

Diversos materiais semicondutores podem ser utilizados na fabricação das células solares, e a capacidade de produção de energia dos módulos e painéis está diretamente relacionada às características e restrições físicas dessas células. Por isso, a escolha do material a ser usado na fabricação é de suma importância (BORGES, 2013).

As células podem ser construídas com elementos simples, como silício ou selênio, ou por compostos e ligas, como sulfeto de cádmio ou arsenieto de gálio (PRIEB, 2002). Esses

materiais, antes de serem utilizados na fabricação das células, devem passar por processos de purificação (PINHO; GALDINO, 2014). Os principais elementos utilizados são o silício cristalino e os filmes finos, com destaque para o silício, que é o segundo elemento mais abundante na Terra e é menos tóxico que os demais (ASSUNCAO, 2014; SAGA, 2010).

A.2.2.1 Silício Cristalino (c- Si)

O silício cristalino, denominado c-Si, é caracterizado por sua alta robustez e confiabilidade, apesar de possuírem um custo de produção mais elevado. Além disso, possuem maior estabilidade e durabilidade (GIZ; SENAI, 2018). Esse elemento é o mais eficiente e mais utilizado comercialmente em escala mundial, e é dividido em dois grupos: silício monocristalino e policristalino (SEBRAE, 2017).

O cristal de silício puro possui 4 elétrons de ligação e não possuem elétrons livres, sendo definido, portanto, como um mal condutor elétrico. Como solução, outros elementos são adicionados para ocorrer a dopagem do silício (PINHO; GALDINO, 2014).

Átomos de fósforo, por exemplo, possuem 5 elétrons de ligação e são adicionados ao silício formando a dopagem do tipo N (silício tipo N), pois haverá um elétron em excesso que ficará fracamente ligado à seu átomo de origem. Da mesma forma, átomos de boro possuem apenas 3 elétrons de ligação e são acrescentados no silício, de modo que ocorra a falta de um elétron, formando a dopagem do tipo P (silício tipo P) (NASCIMENTO, 2004; PINHO; GALDINO, 2014).

Silício Monocristalino (m-Si): possuem estrutura de cristal homogênea, e necessita de tecnologia complexa e muita energia no processo de produção, que começa pela extração do cristal de dióxido de silício, elevando seu custo. Por outro lado, apresenta elevada eficiência, atingindo em torno de 15%, e vida útil em torno de 20 anos (PINHO; GALDINO, 2014; SEBRAE, 2017).

Silício Policristalino (p-Si): possuem estrutura de cristal não-homogênea, requerem menos energia no processo de produção e, por isso, seu custo é inferior às células de silício monocristalino. Porém é menos eficiente, atingindo em torno de 13%, principalmente quando exposta à radiação difusa e altas temperaturas (LEITE, 2012; SEBRAE, 2017).

A.2.2.2 Filmes Finos

Os filmes finos têm como principal característica a sua espessura, na faixa de 1 micrômetro, sendo até 400 vezes mais fina que as células de silício cristalino. São desenvolvidos para aplicações solares fotovoltaicas possuem baixo custo de produção, pois possuem alto nível de automação e necessitam de uma menor quantidade de material e de energia, elevando sua capacidade de produção (RüTHER, 2004; SEBRAE, 2017).

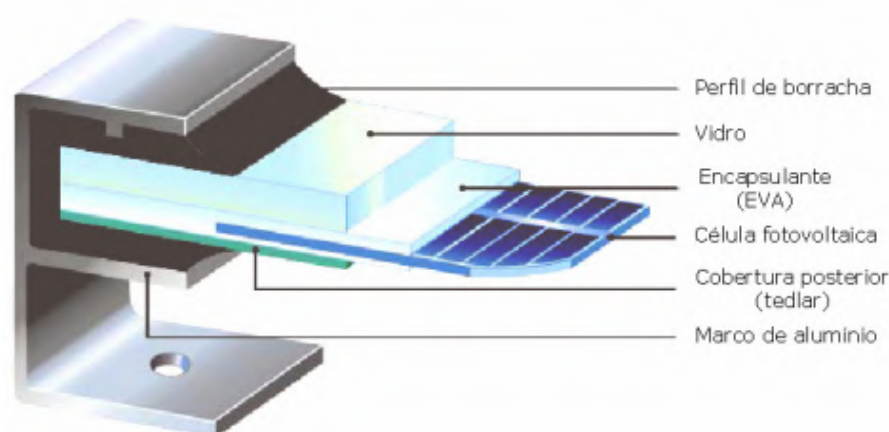
No entanto, possui baixo rendimento, é composto por elementos tóxicos e sofre uma degradação maior de rendimento ao longo do tempo, fatores que diminuem sua aceitabilidade no mercado. As células de filmes finos são menos eficientes e são divididas em 3 grupos: amorfas, telureto de cádmio (CdTe) e cobre, índio e gálio seleneto (CIGS/CIS), sendo as amorfas as mais comuns. (PINHO; GALDINO, 2014; SEBRAE, 2017)

Silício Amorfo (a-Si): as células de silício amorfo são caracterizadas pela desordem na estrutura de seus átomos. São mais leves, flexíveis, mecanicamente resistentes, semitransparentes e, por isso, são mais versáteis. A produção de células com esse tipo de elemento pode ser replicada em larga escala, apesar de serem mais propensas a sofrerem degradação e terem um nível muito menor de eficiência quando comparadas às células de silício cristalinas, atingindo apenas cerca de 7% (LEITE, 2012).

A.2.3 Componentes e Estrutura

As células solares possuem uma baixa tensão individual, de aproximadamente 0,5V, por isso, geralmente são conectadas em série, formando módulos. Além das células solares, que são soldadas e encapsuladas como formas de proteção, e as interconexões elétricas que fazem parte do conjunto elétrico, os módulos fotovoltaicos são compostos por uma série de componentes, como coberturas, encapsulante, moldura e conexões, como mostra a Figura 56 (GASPARIN, 2009).

Figura 56 – Representação de um corte do Módulo Fotovoltaico

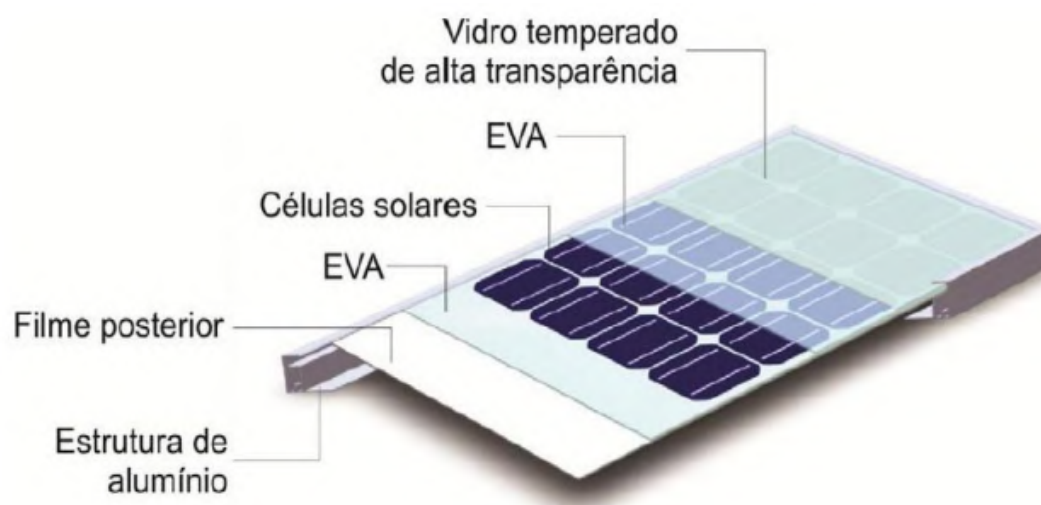


Fonte: (PRIEB, 2002)

Na cobertura frontal é geralmente utilizado vidro temperado transparente, como forma de minimizar as perdas por absorção. A cobertura posterior geralmente é desenvolvida com um material conhecido como Tedlar, devido a sua rigidez dielétrica que garante o

isolamento elétrico adequado, e sua baixa resistência térmica, ideal para a dissipação do calor do módulo. O encapsulante deve ser feito com material termoplástico transparente, geralmente o EVA (o acetato de etil vinila). Esse material tem boa aderência nas células, além de serem eletricamente isolante e resistente à umidade, fadiga mecânica e ação dos raios ultravioleta. A moldura garante a resistência mecânica do módulo, e é produzida com material metálico, geralmente alumínio, que possibilite a rigidez mecânica do módulo e uma melhor fixação (GASPARIN, 2009; PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 57 – Materias utilizados nos componentes do Módulo Fotovoltaico



Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014)

Além dos componentes, a maioria dos sistemas fotovoltaicos possuem inversores, equipamento eletrônico que realiza a conversão da corrente CC vinda do sistema fotovoltaico em AC, de modo que essa energia seja injetada na rede com o mesmo padrão de tensão, frequência e fase, e com menores perdas (VIANA, 2010; SEBRAE, 2017).

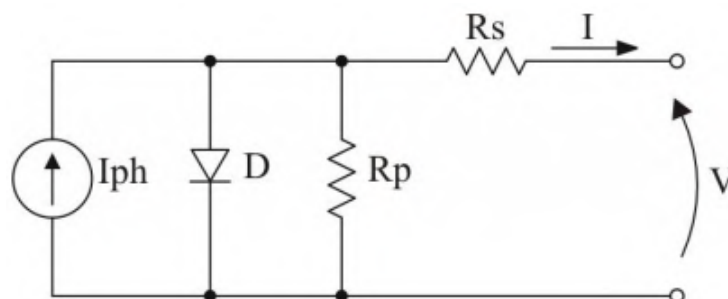
A.2.4 Características Elétricas

Os módulos FV podem ser conectados entre si de duas formas, em série ou em paralelo, de acordo com a potência requerida pelo sistema. Quando em série, a tensão de saída é equivalente à soma direta das tensões dos módulos conectados, e a corrente é igual em todos os módulos. Quando em paralelo, a corrente de saída é equivalente à soma das correntes dos módulos e a tensão é igual em todos os módulos. A combinação desses dois tipos de conexão permite obter diversos valores de tensão e corrente de saída, conforme o número de módulos em cada ligação (LEITE, 2012).

O circuito equivalente simplificado de uma célula FV (Figura 58) pode ser representado por uma fonte de corrente em paralelo com um diodo e associado a um circuito

resistivo (CASARO; MARTINS, 2008).

Figura 58 – Circuito equivalente de uma Célula Fotovoltaica

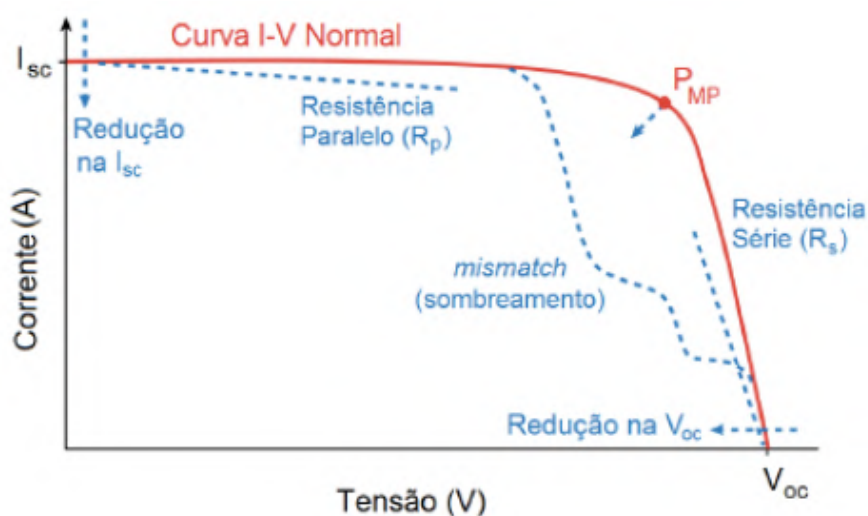


Fonte: (CASARO; MARTINS, 2008)

A relação entre corrente e tensão dos módulos podem ser analisadas a partir da curva I-V do sistema, que representa o comportamento da corrente em função da tensão nos terminais, e é a base para o funcionamento no ponto de potência máxima do módulo (LUNA, 2016). Conforme exposto anteriormente, a potência do sistema varia de acordo com a corrente e tensão dos terminais do módulo, que podem sofrer interferências também por condições ambientais, como radiação solar e temperatura.

Com o objetivo de buscar sempre a eficiência máxima dos módulos, existe um sistema eletrônico que funciona como um “seguidor de potência máxima”, também denominado MPPT *Maximum Power Point Tracker*. O MPPT é basicamente um conversor DC/DC que ajusta a tensão de saída do módulo de modo que este funcione sempre no ponto correspondente à sua potência máxima, de acordo com as variações de radiação solar, temperatura e as condições impostas pela rede elétrica. Na curva I-V, este ponto é sempre a máxima área, ou seja, é o ponto no qual o produto da corrente pela tensão é máximo, obtendo a maior potência (PEARSALL; HILL, 2001).

Figura 59 – Curva I-V de um Painel Fotovoltaico afetado pelo PID



Fonte: (CASARO; MARTINS, 2008)

Os principais parâmetros da curva I-V que caracterizam os módulos estão definidos a seguir, de acordo com os trabalhos de Assuncao (2014) e Luna (2016):

- Corrente de curto-circuito (I_{sc}):** medida antes de haver qualquer conexão no equipamento, ao ligar os terminais de um módulo diretamente, a I_{sc} é a corrente máxima que o módulo produz quando a tensão nos terminais é nula;
- Tensão de circuito aberto (V_{oc}):** é a tensão máxima que um módulo é capaz de produzir quando submetido à radiação solar e sem carga, de modo que não haja corrente elétrica circulando nos terminais;
- Ponto de potência máxima (MPP):** ponto de operação onde se atinge o valor máximo de potência, gerado sob condições determinadas de temperatura e irradiância solar;
- Corrente no ponto de potência máxima (IMPP):** corrente medida no ponto de potência máxima do módulo;
- Tensão no ponto de potência máxima (VMPP):** tensão medida no ponto de potência máxima do módulo;
- Fator de forma (FF):** parâmetro que indica a qualidade das células, definido pela relação entre a potência no MPP e o produto de I_{sc} por V_{oc} . Quanto mais novo for o módulo, maior é o valor do fator de forma, que pode variar entre 0 e 1.
- Rendimento (η):** é o valor de eficiência dos módulos, ou seja, indica o quanto de energia solar que pode ser convertida em energia elétrica. Este parâmetro

é definido como a relação entre a potência no MPP e a potência total da luz incidente no módulo. Módulos de silício cristalino alcançam rendimentos de 13% a 15 %.

A.3 Degradação das Placas Solares

Diferentes fatores contribuem para a perda de eficiência nos geradores fotovoltaicos ao longo do tempo de uso. Além dos efeitos naturais de degradação, existem os efeitos temporais e também os efeitos devido à sua polarização, os quais influenciam diretamente na potência gerada nos módulos afetados e interferem consideravelmente o seu desempenho (FILHO; FIGUEIREDO, 2017).

Alguns dos fatores de perda nos sistemas fotovoltaicos são: sombreamento, aumento da temperatura, descasamento de módulos, degradação dos painéis, corrosão, delaminação, descoloração, efeito LID e efeito PID

- a) **Sombreamento:** redução da radiação incidente em cada célula do módulo devido ao sombreamento por árvores, postes e construções, ou quando algo cai em cima de uma ou mais células;
- b) **Aumento de Temperatura:** aumento da temperatura de operação decorrente do aumento da irradiação e temperatura incidentes, que provocam a perda de potência no módulo;
- c) **Descasamento de módulos (*mismatch*):** incompatibilidade entre as características dos módulos do sistema, uma vez as células que compõem o módulo possuem características próprias;
- d) **Degradação dos painéis:** é um tipo de degradação natural e gradual decorrente à exposição dos painéis no clima;
- e) **Corrosão:** ocorre devido à umidade nas camadas de material metalizado e vidro na estrutura dos painéis, principalmente nas bordas;
- f) **Delaminação:** é a perda de aderência entre as camadas do módulo, principalmente entre o vidro e a célula e o encapsulante e a célula, que propiciam as degradações física e química;
- g) **Descoloração:** degradação do material adesivo entre o vidro e a célula, ou do EVA, devido à reações químicas do material, que influencia a transmissão da luz para a célula;
- h) **LID (*Light Induced Degradation*):** é a degradação induzida pela luz na célula nas primeiras horas de exposição ao sol, até que o módulo alcance um nível estável;

- i) **PID (*Potencial Induced Degradation*)**: degradação causada por correntes de fuga que passam da estrutura do vidro e encapsulante das células para a terra, e resultam em grandes perdas de desempenho. Esse tipo de degradação geralmente é observado em sistemas de grande porte, com uma série de módulos interligados, onde existe uma maior diferença de potencial em relação à terra.

Anexos

ANEXO A – CÓDIGOS DE PROGRAMAÇÃO

A.1 Código *Main*

```
import machine

back_door = machine.Pin(27, machine.Pin.IN,
machine.Pin.PULL_DOWN)
config_button = machine.Pin(26, machine.Pin.IN,
machine.Pin.PULL_DOWN)

if back_door.value() == 1:
    try:
        key = input("Voce deseja interromper o codigo?
\nDigite sim ou nao.\n")
        if (key == "sim"):
            print ("\nVoce que manda, mestre!\n")
            exit
        else:
            pass
    except (KeyboardInterrupt):
        import machine
        machine.reset()

elif config_button.value() == 1:
    try:
        from web_server import *
        main()
    except (KeyboardInterrupt):
        import machine
        machine.reset()

else:
    from progfinal import *
```

A.2 Código Principal

```
from machine import I2C, Pin, Timer
import ads1x15
from time import sleep_ms, ticks_ms, ticks_us, sleep
from array import array
import network
from umqtt.simple import MQTTClient
import ujson as json
from NTPLib import *

a = open (" config.json ", " r ")
b = a.read()
values = json.loads(b)
a.close()
WiFi_SSID = values [" SSID "]
WiFi_PASS = values [" PASSWORD "]
topic = values [" TOPIC "]
V_GAIN = float(values [" v_gain "])
V_OFFSET = float(values [" v_offset "])
I_GAIN = float(values [" i_gain "])
I_OFFSET = float(values [" i_offset "])

addr = 72
gain = 1

reg = Pin(14, Pin.OUT)
reg.value(1)

i2c = I2C(scl=Pin(16), sda=Pin(17), freq=400000)

ads = ads1x15.ADS1115(i2c, addr, gain)

def mqtt_connect(_clientID = "umqtt_client",
    _host="data.eneltec.com.br", _user = "admin",
    _password = "M4rc0s1474", _port = 15015):
    c = MQTTClient(_clientID, _host, user = _user,
        password = _password, port = _port)
    c.connect()
```

```
    return c

def do_connect():
    wlan = network.WLAN(network.STA_IF)
    wlan.active(True)
    if not wlan.isconnected():
        print('connecting to network...')
        wlan.connect(WiFi_SSID, WiFi_PASS)
        while not wlan.isconnected():
            pass
    print('network config:', wlan.ifconfig())

def read(a, b, c):
    return ads.read(a, b, c)

def conv(a):
    return ((a-20086)*0.0006637)

do_connect()
client = mqtt_connect()

while True:

    try:
        readt = read(7,0,1)*0.003854
        print("Valor tensao: ", readt, "V")

        readc = read(7,2,3)
        readc = conv(readc)
        print("Valor corrente: ", readc, "A")

        payload = {
            "format": "jsonV2",
            "device": {
                "type": "natalia",
                "JokerVersion": "3.2",
                "BatVoltage": 0,
                "SupplyVoltage": 0,
```

```
        "Status": ""
    },
    "payload": {
        "tensao": 0.0,
        "corrente": 0.0
    },
    "unit": {
        "tensao": "V",
        "corrente": "A"
    },
    "timestamp": 0
}
payload["payload"]["tensao"] = readt
payload["payload"]["corrente"] = readc

print (json.dumps(payload))

#client.connect()
client.publish(topic, json.dumps(payload))
#client.disconnect()

print ("Envio bem sucedido!")
sleep(5)

except KeyboardInterrupt:
    break

except:
    print ("Erro na leitura")
    pass
```