



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica

MANOEL ALVES DELSON

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
MONITORAMENTO DE BAIXO CUSTO PARA
OBTENÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Bom Jesus da Lapa-BA
Julho de 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA

Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa

Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica

Manoel Alves Delson

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO
DE BAIXO CUSTO PARA OBTENÇÃO DA CURVA
CARACTERÍSTICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Profa. Dra. Stefânia de Oliveira Silva

Coorientador: Prof. Dr. Kleymlson do Nascimento Souza

Bom Jesus da Lapa–BA

Julho de 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

D365

Delson, Manoel Alves

Desenvolvimento de um sistema de monitoramento de baixo custo para obtenção da curva característica de módulos fotovoltaicos. / Manoel Alves Delson. – 2023.

68f.:

Orientadora: Profa. Dra. Stefânia de Oliveira Silva

Coorientador: Prof. Dr. Kleymilson do Nascimento Souza

TCC - Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA, 2023.

1. Engenharia Elétrica – Processamento de Dados. 2. Energia Solar. I. Silva, Stefânia de Oliveira. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA. III. Título.

CDD 621.30285

Biblioteca Universitária de Bom Jesus da Lapa – UFOB

FOLHA DE APROVAÇÃO

MANOEL ALVES DELSON

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE BAIXO CUSTO PARA OBTENÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Esta monografia do Trabalho de Conclusão de Curso foi aprovada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, aprovada em sua forma final pelo Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia.

Bom Jesus da Lapa, 14 de Julho de 2023

Profa. Dra. Stefânia de Oliveira Silva (UFOB)
(Orientadora)

Prof. Dr. Kleymilson do Nascimento Souza (UFOB)
(Coorientador)

Prof. Dr. Manoel Messias Silva Júnior (UFOB)

Prof. Msc. Genival Alves dos Anjos Filho (UFOB)

Esta monografia é dedicada à minha família e à memória do meu pai, João Alves Delson.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por suas graças em cada dia na minha vida, que me permitiu ser perseverante, caminhando com fé e otimismo de que tudo concorreria para finalizar a graduação.

Agradeço imensamente aos meus irmãos e às minhas irmãs pelo apoio e compreensão, em especial agradeço à minha mãe Diva Alves da Costa que sempre esteve ao meu lado, rezando e me apoiando pelo sucesso na graduação e ao longo de toda vida.

Agradeço aos amigos e colegas.

Agradeço a Universidade Federal do Oeste da Bahia pelos recursos financeiros aplicados e disponibilizados por meio da assistência estudantil, pelo programa de monitoria remunerada, bem como pela estrutura para realização deste trabalho e estudos do dia a dia enquanto graduando.

Agradeço a assistência social, aos servidores, técnicos, pessoas responsáveis pela limpeza e vigilantes.

Agradeço todo corpo docente da Universidade Federal do Oeste da Bahia pelo aprendizado, orientações e companherismo. Em especial agradeço à professora Dra. Stefânia de Oliveira Silva pela sua valiosa orientação neste trabalho, bem como nos trabalhos de Iniciação Científica Voluntária vinculado ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) da Universidade Federal do Oeste da Bahia e outros que foram realizados sob a sua orientação e supervisão.

Agradeço também ao professor Dr. Kleymilson do Nascimento Souza pela sua coorientação e direcionamento em trabalhos que tive a oportunidade de participar.

“Sem mim, nada podeis fazer.”

(Jo 15, 5)

Resumo

A obtenção da curva característica dos módulos fotovoltaicos propicia um meio que permite verificar se as potências nominais dos equipamentos, em operação, coincidem com os dados dos manuais disponibilizados pelos fabricantes. Além disso, o ensaio da curva característica garante uma avaliação prévia do sistema antes de ser iniciada sua operação, pois representa ao projetista uma ferramenta valiosa de análise de desempenho do sistema fotovoltaico, uma vez que, por meio dela pode-se identificar os defeitos causadores de baixo rendimento. Este trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de monitoramento para obtenção da curva característica de módulos fotovoltaicos. A variação dos valores de tensão elétrica e corrente elétrica serão fornecidos pelo sistema sob a variabilidade da irradiância, na qual possibilitará o estudo e a análise da eficiência energética dos módulos fotovoltaicos. O dispositivo foi implementado com a placa de desenvolvimento NodeMCU 1.0, baseada no microcontrolador ESP8266, que processa as grandezas elétricas. Testes e simulações foram previamente realizados no programa Proteus 8.12, versão SP0 Build 30834, a fim de certificar a funcionalidade do dispositivo desenvolvido. Uma vez com os dados coletados e acessíveis de forma remota, estes passarão por um tratamento tornando-se, assim, úteis para empresas solares de grande porte.

Palavras-chave: Eficiência energética. Energia solar. Microcontrolador. Banco de dados.

Abstract

Obtaining the characteristic curve of the photovoltaic modules provides a means to verify whether the nominal powers of the equipment in operation coincide with the data in the manuals provided by the manufacturers. In addition, the characteristic curve test guarantees a prior evaluation of the system before starting its operation, as it represents a valuable tool for the designer to analyze the performance of the photovoltaic system, since, through it, the causes of defects can be identified. low yield. This work aimed to develop a monitoring system to obtain the characteristic curve of photovoltaic modules. The variation of the values of electric voltage and electric current will be provided by the system under the variability of the irradiance, in which it will make possible the study and analysis of the energy efficiency of the photovoltaic modules. The device was implemented with the NodeMCU 1.0 development board, based on the ESP8266 microcontroller, which processes electrical quantities. Tests and simulations were previously performed in the Proteus 8.12 program, version SP0 Build 30834, in order to certify the functionality of the developed device. Once the data is collected and accessible remotely, it will undergo treatment, thus becoming useful for large solar companies.

Keywords: Energy efficiency. Solar energy. Microcontroller. Database.

Lista de Figuras

1	Oferta interna de energia elétrica por fonte em 2020	21
2	Desenvolvimento da proposta	22
3	Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica	25
4	Curva IV de uma célula fotovoltaica	26
5	Fator de forma de uma célula fotovoltaica	28
6	Curva característica obtida com variação da resistência	30
7	Conexão do módulo fotovoltaico ao conversor CC-CC	31
8	Conexão do módulo à carga eletrônica	31
9	Carga capacitiva e forma de ondas da tensão e corrente elétrica	32
10	Placa de desenvolvimento ESP8266 NodeMCU	32
11	Pinos da placa de desenvolvimento ESP8266 NodeMCU	33
12	Módulos fotovoltaicos para monitoramento	41
13	Visão geral do sistema de monitoramento	43
14	Conexão do módulo ADC ao ESP8266	43
15	Envio das grandezas elétricas para o banco de dados <i>MySQL</i>	44
16	Criação da tabela no banco de dados <i>MySQL</i>	44
17	Visualização da estrutura da tabela criada no banco de dados <i>MySQL</i> por meio da ferramenta <i>phpMyAdmin</i>	45
18	Rotina para conexão ao banco de dados <i>MySQL</i>	45
19	Configuração da rede Wi-Fi	45
20	Circuito divisor de tensão com condicionador de tensão	46
21	Circuito elétrico do voltímetro	47
22	Fluxograma para cálculo da tensão elétrica gerada	48
23	Circuito básico do amperímetro	49
24	Diagrama de conexões do AD620	50
25	Circuito elétrico do amperímetro	52

26	Fluxograma para cálculo da corrente elétrica gerada	52
27	Circuito elétrico da carga eletrônica	53
28	Acoplamento do módulo serial I2C ao LCD: (a) conexão dos pinos do LCD, (b) vista da parte inferior do LCD conectado ao módulo serial I2C	55
29	Circuito elétrico básico para medição da tensão elétrica e corrente elétrica .	55
30	Placas de circuitos impressos produzidas: (a) amperímetro, (b) carga eletrônica, (c) voltímetro, (d) barramento para conexão do amperímetro, voltímetro e carga eletrônica	56
31	Coletor de dados desenvolvido	56
32	Fluxograma do algoritmo do sistema de monitoramento	57
33	Simulação do circuito elétrico dos instrumentos de medida	59
34	Varredura dos pontos da curva IV com o descarregamento do capacitor . .	60
35	Reinicialização do processo de varredura dos pontos da curva IV	61
36	Aquisição de dados no módulo fotovoltaico de 10 W	62
37	Dados parciais do módulo de 10 W no banco de dados	62
38	Curva IV do módulo fotovoltaico de 10 W	63
39	Gráfico da tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico de 10 W . . .	63
40	Gráfico da corrente de curto-circuito do módulo de 10 W	64

Lista de Tabelas

1	Lista de materiais	41
2	Módulo fotovoltaico de 95 W	42
3	Módulo fotovoltaico de 10 W	42

Lista de quadros

1	Pinagem completa do módulo ESP8266 NodeMCU	34
2	Portas de entrada e saída da placa ESP8266 NodeMCU	35
3	Síntese Bibliográfica	40
4	Descrição dos pinos do AD620	51
5	Características eléctricas do MOSFET IRFP064N	52

Lista de abreviaturas, acrônimos e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
AOP	Amplificador Operacional
a-Si	Silício amorfo
BJT	<i>Bipolar Junction Transistor</i>
CC/CA	Corrente Contínua/Corrente Alternada
CC-CC	Corrente Contínua-Corrente Contínua
CdTe	Telureto de Cádmio
CI	Circuito Integrado
CIGS	Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio
CIS	Disseleneto de Cobre e Índio
CLK	Clock
CMD	<i>Command</i>
CP	Computador Pessoal
CS	<i>Chip Select</i>
CSS	<i>Cascading Style Sheets</i>
CSV	<i>Comma Separated Values</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FF	Fator de Forma
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
HTML	<i>HyperText Markup Language</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IHM	Interface Humano-Máquina
IMP	Corrente de Máxima Potência
IV	Produto entre a corrente elétrica e a tensão elétrica
I2C	<i>Inter-Integrated Circuits</i>
LA	Local de Armazenamento

LabView	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LP	Linguagem de programação
Matlab	<i>Matrix Laboratory</i>
MISO	<i>Master Input Slave Output</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MOSI	<i>Master Output and Slave Input</i>
m-Si	Silício monocristalino
NA	Não se aplica
NBR	Norma Brasileira
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PHP	Pré-Processador de Hipertexto (<i>Hypertext Preprocessor</i>)
PMP	Ponto de Máxima Potência
p-Si	Silício policristalino
SCL	<i>Serial CLock</i>
SCLK	<i>Serial CLock</i>
SDA	<i>Serial Data</i>
SEPIC	<i>Single-Ended Primary Inductor Converter</i>
SGBD	Sistema Gerenciador de Banco de Dados
SM	Sistema Microprocessado
SPI	Interface Serial de Periféricos (<i>Serial Peripheral Interface</i>)
SQL	<i>Structured Query Language</i>
TC	Tipo de comunicação
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VMP	Tensão de Máxima Potência
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

Lista de Símbolos

A	Ampère
A_c	Área da célula fotovoltaica
C	Coulomb ou símbolo para o capacitor
cm	Centímetro
D	Razão cíclica do conversor CC-CC
E	<i>Enable</i>
η	Eficiência da célula fotovoltaica
G	Irradiância solar
Hz	Hertz
FF	Fator de forma
i	Corrente elétrica
I_o	Corrente de saturação
I_{SF}	Corrente do sistema fotovoltaico
I_D	Corrente do diodo
I_{DM}	Corrente Máxima do Dreno
I	Corrente elétrica
I_L	Corrente fotogerada
I_{PV}	Corrente Fotovoltaica (<i>Current Photovoltaic</i>)
I_{sc}	Corrente de Curto-circuito (<i>Short-Circuit Current</i>)
I_{shunt}	Corrente paralela (Corrente <i>shunt</i>)
G	Ganho do amplificador operacional
o	Grau(s)
G_i	Potência da Energia Solar Incidente

<i>GND</i>	<i>Ground</i>
J	Joule
k	Constante de Boltzmann
K	Kelvin
m	Metro
mA	Miliampere
m^2	Metro quadrado
μ	Micro
Ω	Ohm
%	Porcentagem
P	Potência
P_D	Potência de Dissipação
P_V	<i>Photovoltaic</i>
q	Carga do elétron
R	Resistor
R_{carga}	Resistência da carga
R_D	Resistência para dissipação de potência
R_{DS}	Resistência Dreno-Source
R_G	Resistor de ganho
R_{LCD}	<i>Read</i> (Habilitar modo de leitura do LCD)
R_p	Resistência em paralelo
R_s	Resistência em série
RS	<i>Register Select</i>
R_{shunt}	Resistência paralela (Resistência <i>shunt</i>)
R\$	Moeda Real
s	Segundos
σ	Constante de Stefan - Boltzmann
T	Temperatura
V	Unidade de medida Volt e tensão elétrica

V_{AD620}	Tensão na saída do AOP AD620
v_d	Tensão discretizada
VCC	Pino da tensão de alimentação do LCD
VDD	Pino da tensão de alimentação do LCD
V_{DS}	Tensão Dreno-Source (<i>Drain-Source Voltage</i>)
VEE	Pino da tensão de alimentação do LCD
V_{GS}	Tensão Gate-Source (<i>Gate-Source Voltage</i>)
V_{IN}	Tensão de entrada (<i>Voltage input</i>)
V_{INPV}	Tensão de entrada do módulo fotovoltaico
V_{OUT}	Tensão de saída (<i>Voltage output</i>)
V_{shunt}	Tensão paralela (Tensão <i>shunt</i>)
V_{oc}	Tensão de Circuito Aberto (<i>Voltage Open Circuit</i>)
V_{PV}	<i>Voltage Photovoltaic</i>
V_0	Pino da tensão de alimentação do LCD
VSS	Pino de aterramento do LCD
W	<i>Watt</i>
W_{LCD}	Write (Habilitar modo de escrita do LCD)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Contextualização	20
1.2	Justificativa	21
1.3	Objetivo	21
1.3.1	Objetivos Específicos	22
1.4	Metodologia da Pesquisa	22
1.5	Organização do Texto	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	Energia Solar Fotovoltaica	24
2.2	Características dos Módulos Fotovoltaicos	25
2.2.1	Características Elétricas	26
2.3	Caracterização da Curva IV	29
2.3.1	Carga Resistiva Variável	30
2.3.2	Conversor CC-CC com Carga Resistiva	30
2.3.3	Carga Eletrônica	31
2.3.4	Carga Capacitiva	31
2.3.5	Fontes de Quatro Quadrantes	32
2.4	ESP8266 NodeMCU	32
2.5	Sistemas de Aquisição de Dados	35
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	36
4	DESENVOLVIMENTO	41
4.1	Unidade de Processamento	42
4.2	Configuração do Banco de Dados	43
4.3	Módulo do Voltímetro	45
4.4	Módulo do Amperímetro	48

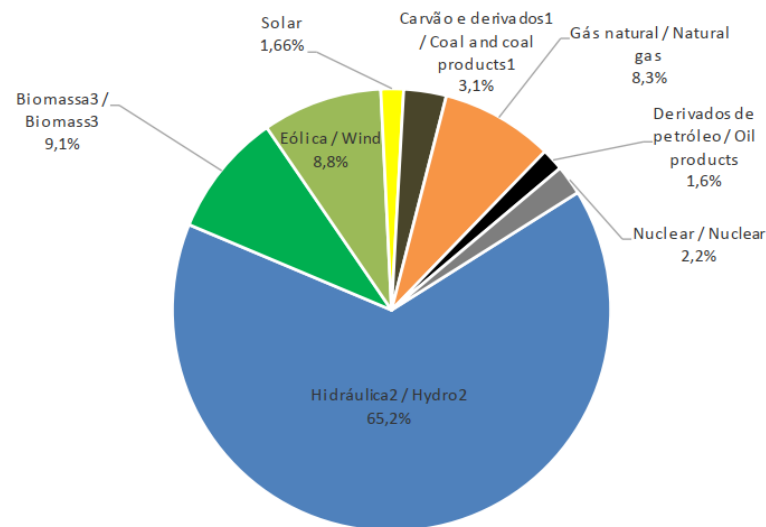
4.5	Carga Variável	51
4.5.1	Estágio de Potência	51
4.5.2	Estágio de Comando	52
4.6	Interface Humano-Máquina	53
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1	Simulação dos Circuitos Elétricos	58
5.2	Obtenção dos Dados nos Módulos Fotovoltaicos	60
6	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	68

INTRODUÇÃO

O homem precisa fazer um melhor aproveitamento e otimização nas formas de coleta das fontes de energia renováveis disponíveis. A energia solar é abundante, sendo ela como fonte de calor quanto fonte de luz (GOLDEMBERG; CHU, 2010). É uma das alternativas mais promissoras para estudo e investimentos que visam a otimização é na conversão energética. Essa fonte de energia pode ser usada para fornecer sustentabilidade necessária se existir equipamentos eficientes para realizar sua coleta.

1.1 Contextualização

A diversidade das fontes energéticas que compõe a matriz sustentável do Brasil, contribui para que o país tenha uma segurança ostensiva. A administração pública exerce um papel importante no desenvolvimento das diretrizes, de tal forma, que garanta uma política energética consistente e acessível, sobretudo nos aspectos que tangem à produção e ao uso de energia elétrica por meio das fontes renováveis. Segundo dados da EPE (2021), disponíveis no relatório do Balanço Energético Nacional 2021, a geração hidrelétrica por ser de origem renovável representou 65,2% da oferta interna de energia elétrica, tendo aumento para 84,8% quando somado ao montante gerado pelas demais fontes renováveis como biomassa, eólica e solar conforme mostra a Figura 1. E de acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021, divulgado pela EPE em parceria com o Ministério de Minas e Energia (MME), o ano de 2020 foi marcado por um aumento de 32,9% na geração solar em relação ao ano de 2019 (MME, 2021). O mesmo anuário mostrou que no cenário internacional, em 2018, o Brasil ocupou a vigésima posição no quesito capacidade instalada de geração solar.

Figura 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte em 2020

Fonte: EPE (2021)

Os dados para a geração solar podem ser maiores, segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), uma vez que não foi considerada a geração de energia elétrica de sistemas solares fotovoltaicos de microgeração e minigeração distribuída. Esses sistemas estão localizados em unidades consumidoras como residências, comércios, indústrias, edifícios públicos e na zona rural (ONS, 2021).

1.2 Justificativa

O monitoramento dos sistemas fotovoltaicos que fazem parte da micro e minigeração distribuída se convertem em uma ferramenta para contabilização e análise do desempenho da geração solar no Brasil. O monitoramento também pode ser realizado com o intuito de avaliar, de forma prévia, os principais fatores que influenciam no rendimento do módulo ou sistema fotovoltaico, como a escolha do ângulo de inclinação que trará maior absorção da radiação e a escolha do local da instalação do sistema. Segundo Fuentes et al. (2014), adquirir os valores das grandezas associadas aos módulos fotovoltaicos é uma forma de entender e analisar o seu comportamento na geração. As figuras de méritos a serem observadas são a tensão elétrica e a corrente elétrica, que por meio destas, verifica-se a potência gerada pelo módulo.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver um dispositivo com sistema embarcado de baixo custo para ser utilizado na coleta dos dados da geração de energia elétrica mediante

monitoramento remoto e obtenção da curva característica dos módulos fotovoltaicos. E como objetivos específicos, têm-se:

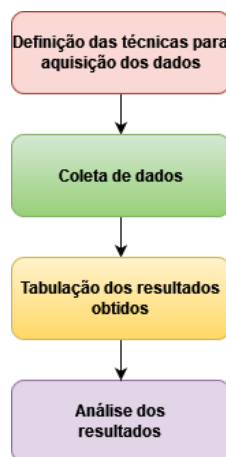
1.3.1 Objetivos Específicos

- Definir o modelo de caracterização dos módulos fotovoltaicos;
- Desenvolver os circuitos elétricos do voltímetro e do amperímetro;
- Simular os circuitos elétricos dos instrumentos de medição;
- Construir as placas de circuitos impressos;
- Configurar o banco de dados;
- Desenvolver a página *web* para visualização das informações da geração solar;
- Programar o voltímetro e o amperímetro;
- Testar os instrumentos de medição com os módulos fotovoltaicos;
- Avaliar o desempenho do sistema de monitoramento.

1.4 Metodologia da Pesquisa

A metodologia adotada deu-se por meio da revisão bibliográfica e análise experimental da confecção do dispositivo eletrônico embarcado. A Figura 2 apresenta a estrutura esquemática da pesquisa.

Figura 2 – Desenvolvimento da proposta



Fonte: Adaptada de Praça (2015)

1.5 Organização do Texto

Capítulo 2 – Apresenta-se a fundamentação teórica. Nesse capítulo são abordados os aspectos da constituição e configuração de um sistema fotovoltaico, bem como das metodologias para a obtenção das grandezas elétricas.

Capítulo 3 – Descreve-se a revisão bibliográfica a fim de verificar os trabalhos que foram realizados, recursos e resultados obtidos.

Capítulo 4 – Realiza-se o desenvolvimento do trabalho. Neste capítulo são descritos os recursos físicos e computacionais. Os recursos físicos estão relacionados aos componentes eletrônicos e insumos utilizados para a desenvolvimento das placas de circuitos impressos. Os recursos computacionais compreende as tecnologias de banco de dados, linguagens de programação: C++, HTML, PHP, *JavaScript* e CSS.

Capítulo 5 – Contempla os resultados que foram obtidos, bem como a comparação com os trabalhos apresentados no capítulo 3 ou por meio de instrumentos de medição.

Capítulo 6 – Apresenta a conclusão do trabalho.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A radiação solar é constituída por ondas eletromagnéticas com comprimento de onda que variam de $0,22 \mu m$ a $3 \mu m$. Considerando o Sol um corpo negro com temperatura superficial de 5780 K, a emissão de potência térmica específica (também denominada irradiância solar ou insolação) em cada direção do espaço, é dada pela equação (1) (VIAN et al., 2021):

$$I = \sigma T^4 = 6,33 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2 \quad (1)$$

em que,

- σ - constante de Stefan - Boltzmann
- T - temperatura em Kelvin

Três são os fatores que impedem a emissão da potência total do Sol. Primeiro, a Terra se encontra a uma distância considerável do Sol, recebendo apenas uma fração da energia emitida pela superfície solar. Segundo, a rotação da Terra propicia que apenas uma parte do dia receba a energia emitida pelo Sol. E o terceiro, está relacionado aos efeitos da atmosfera terrestre que diminui a intensidade da radiação em sua superfície. Essas variações dependem das condições atmosféricas, como no caso de incidência de nuvens que podem causar sombreamento (PAIVA, 2018).

2.1 Energia Solar Fotovoltaica

Ao incidir luz sobre uma célula fabricada com material semicondutor, é iniciado o processo do efeito fotovoltaico cuja finalidade é realizar a conversão da luz em eletricidade

(PINHO; GALDINO, 2014).

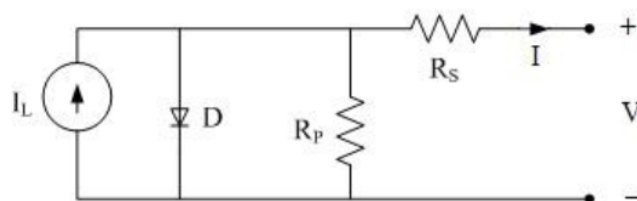
Dado que uma célula gera baixa potência elétrica sob baixa tensão de trabalho, para se fabricar um módulo fotovoltaico de maior potência e maior tensão, é necessário associar o sistema em série ou em paralelo (OLIVA; HERRANZ, 2010). Em determinadas situações, configurações em série podem ser inseridas em grupos para que se realize as conexões em paralelo (OLIVA; HERRANZ, 2010).

Há três gerações de tecnologias empregadas na produção de células fotovoltaicas. A primeira é dividida em duas cadeias produtivas, das quais se tem o Silício monocristalino (m-Si) e Silício policristalino (p-Si), que representam mais de 85% do mercado (PINHO; GALDINO, 2014). A segunda pertence aos filmes finos que estão divididos em três cadeias produtivas, sendo elas, o Silício amorfo (a-Si), Disseleneto de Cobre e Índio (CIS) ou Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS) cuja fórmula química é $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (cobre, índio, gálio e selênio), e Telureto de Cádmio (CdTe). A eficiência dessa geração é menor em relação à primeira, mas apresenta modesta participação no mercado. E a terceira geração que tem uma produção em pequena escala, sendo dividida em três cadeias produtivas: célula fotovoltaica multijunção e para concentração, células sensibilizadas por corante e células orgânicas ou poliméricas (PINHO; GALDINO, 2014).

2.2 Características dos Módulos Fotovoltaicos

A unidade básica de um sistema fotovoltaico é a célula que em conjunto com outras são encapsuladas em módulos para se obter tensão, corrente e potência. A representação do módulo fotovoltaico é baseado no modelo de circuito elétrico da Figura 3, (MELO et al., 2018),

Figura 3 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica



Fonte: Pinho e Galdino (2014)

sendo que D é o diodo e I_L é a corrente elétrica fotogerada. As resistências R_s e R_p representam a resistência em série e em paralelo, respectivamente, e V é a tensão elétrica medida nos terminais da célula fotovoltaica (MELO et al., 2018). As resistências R_s e R_p exercem influências na eficiência e na curva característica do módulo. A resistência R_s origina-se da resistência do próprio material semiconductor, nos contatos metálicos e

na junção metal-semicondutor. Já a resistência R_p é causada por impurezas e defeitos na estrutura do módulo, principalmente próximo às bordas que produzem um caminho interno para uma corrente de fuga, reduzindo assim, a corrente produzida pelo módulo fotovoltaico (PINHO; GALDINO, 2014).

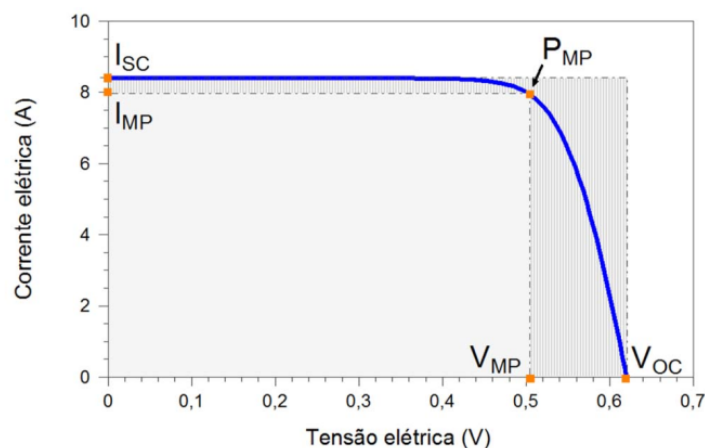
A estrutura metálica do módulo garante proteção às células fotovoltaicas contra desgaste externo decorrente do clima e do ambiente em geral, uma vez que, são depositados em sua superfície poeiras, sujeiras e poluição, ou até mesmo os pássaros e animais que podem danificar o equipamento. A água também interfere no projeto do módulo quando exposto ao clima, dado que suas conexões elétricas devem ser protegidas da umidade, assim, o encapsulamento é fundamental para a vedação tornando-o impermeável à água e outros perigos ambientais (BALFOUR; SHAW; NASH, 2019).

A conexão do sistema fotovoltaico pode ser realizada com a rede elétrica ou isolado. Quando conectado à rede, os módulos e o inversor, convertem a corrente contínua produzida em corrente alternada, com a tensão e frequência dada pelas linhas de transmissão das concessionárias de energia elétrica (OLIVA; HERRANZ, 2010). Já um sistema isolado utiliza baterias para armazenamento de energia, que posteriormente pode ser usada nos períodos em que não há geração (PINHO; GALDINO, 2014).

2.2.1 Características Elétricas

Para verificar a eficiência do sistema fotovoltaico, após a instalação, um diagnóstico pode ser realizado por meio da curva característica (ARAÚJO; LOPES; MOREIRA, 2020). A curva característica, também denominada curva IV, consiste no gráfico formado pela tensão e corrente do módulo, como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Curva IV de uma célula fotovoltaica



Fonte: Pinho e Galdino (2014)

O Ponto de Máxima Potência (PMP) é estabelecido pela intersecção da Corrente de

Máxima Potência (IMP) e da Tensão de Máxima Potência (VMP) (PINHO; GALDINO, 2014). Por meio da curva IV são determinados os parâmetros elétricos que caracterizam o módulo como, Tensão de Circuito Aberto (V_{OC}), Corrente de Curto-Circuito (I_{SC}), fator de forma e eficiência (PINHO; GALDINO, 2014).

Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})

A tensão de circuito aberto é caracterizada como a tensão existente nos terminais da célula fotovoltaica quando não há geração de corrente elétrica (I_L). Conforme a Figura 4, a V_{oc} , máxima tensão que a célula fotovoltaica produz, pode ser obtida de forma direta por meio do voltímetro. A expressão matemática que permite calcular a V_{oc} é dada pela equação (2):

$$V_{oc} = \frac{k \cdot T}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_o} + 1 \right) \quad (2)$$

em que,

- T - temperatura da célula fotovoltaica (em Kelvin)
- k - constante de Boltzmann
- q - carga do elétron
- I_o - corrente de saturação

A queda de tensão sobre o diodo da Figura 3 depende do material no qual a célula é fabricada, e, conseqüentemente, afeta a V_{oc} . Materiais como o silício cristalino que tem larga aplicação na fabricação dos módulos tem uma queda de tensão que varia de 0,5 V a 0,7 V. Por outro lado, as células produzidas com arseneto de gálio tem uma queda de tensão de 3,014 V (PINHO; GALDINO, 2014).

Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})

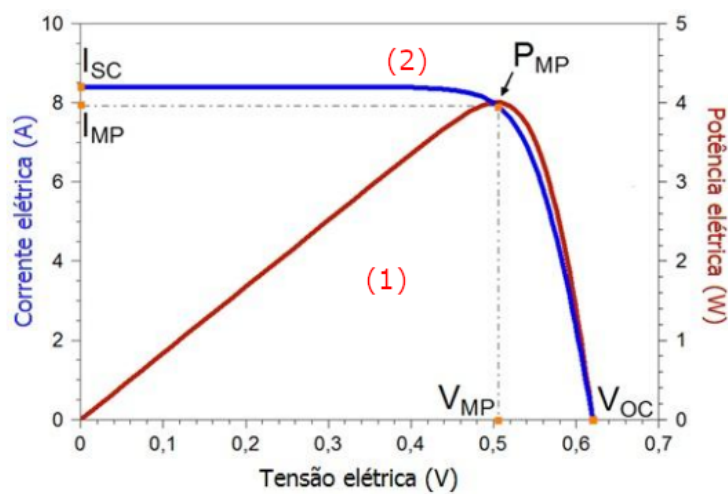
A corrente de curto-circuito é a corrente máxima que a célula pode gerar. A Figura 4 mostra que I_{sc} é obtida quando a tensão nos terminais da célula é igual a zero. A medição da I_{sc} é realizada com um multímetro que curto-circuita os terminais da célula. Os fatores que exercem influência na corrente de curto-circuito são, área da célula, irradiância, distribuição espectral, propriedades ópticas e probabilidade de coleta dos pares elétron-lacuna (PINHO; GALDINO, 2014).

Fator de Forma (FF)

O fator de forma é definido como a razão entre a máxima potência da célula e o produto da corrente de curto-circuito com a tensão de circuito aberto segundo a equação (3). Graficamente, o resultado do fator de forma é a razão entre a área dos retângulos 1 e 2, apresentado na Figura 5.

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

Figura 5 – Fator de forma de uma célula fotovoltaica



Fonte: Pinho e Galdino (2014)

O fator de forma é um parâmetro que ajuda a identificar as perdas resistivas, série e paralelo, pela observação da curva IV que deve ser próxima da forma retangular, que indica nesse caso menores perdas. O silício cristalino e o arseneto de gálio apresentam um FF de 80,9% a 82,8% e 86%, respectivamente (PINHO; GALDINO, 2014).

Eficiência (η)

A eficiência é o parâmetro que define quão efetivo é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica. A equação (4) mostra que a eficiência é dada pela relação entre a potência elétrica produzida pela célula solar e a potência da energia solar incidente (G_i) por sua área, A_c (m^2).

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{A_c \cdot G_i} 100\% = \frac{P_{MP}}{A_c \cdot G_i} 100\% \quad (4)$$

A eficiência para as células de silício monocristalino e silício policristalino é de 25,0% \pm 0,5% e 20,4% \pm 0,5%, respectivamente. As células de arseneto de gálio com

multijunção apresentam eficiência de $37,7\% \pm 1,2\%$ (PINHO; GALDINO, 2014).

2.3 Caracterização da Curva IV

Devido as condições variáveis de irradiação e temperatura ambiente, as células dos módulos fotovoltaicos experimentam aumento de temperatura, e, com isso, compromete-se a curva característica, a eficiência do sistema, queda de tensão e a potência máxima, que deveriam ser fornecida abaixo dos valores especificados pelo fabricante. A fim de certificar se o sistema fotovoltaico está com seus parâmetros elétricos de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante, é realizado testes de comissionamento. Esse tipo de teste é regulamentado pela Norma Brasileira (NBR) 16274 de 2014 emitida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Em um dos pontos é abordado o ensaio e procedimentos para a medição da curva característica do sistema (MOREIRA, 2021).

O ensaio da curva IV garante uma avaliação prévia do sistema antes de ser iniciada sua operação, para isso são obtidas as informações sobre: medidas de V_{oc} e I_{sc} , medição de potência do arranjo, identificação de defeitos nos módulos/arranjos e problemas de sombreamento (ABNT, 2014).

A obtenção da curva IV propicia um meio que permite verificar se a potência nominal do módulo coincide com os dados que são fornecidos no manual do equipamento. Segundo a NBR 16274, algumas diretrizes devem ser seguidas para que se realize a obtenção da curva característica:

- O sistema fotovoltaico deve ser isolado e conectado ao dispositivo de obtenção da curva IV;
- O dispositivo traçador de curva IV deve ser programado com os parâmetros elétricos, o tipo e a quantidade de módulos para testes;
- Para que não haja interferências das sombras, o sensor de irradiância associado ao dispositivo de ensaio deve ser instalado no mesmo plano dos módulos;
- A sonda de temperatura de célula deve ser solidamente fixada na parte posterior do módulo e no centro de uma das células.

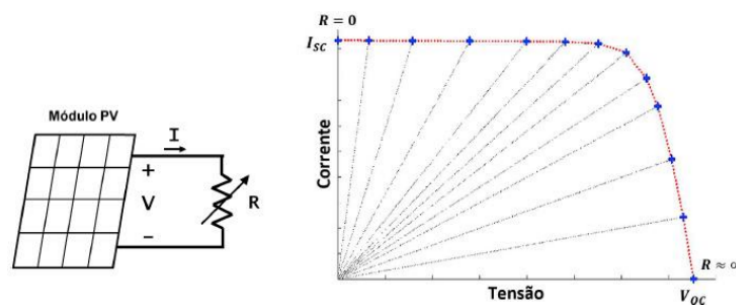
A curva IV representa ao projetista uma ferramenta valiosa de análise de desempenho do sistema fotovoltaico, uma vez que, por meio dela pode-se identificar os defeitos, como: células danificadas, diodos de passagem curto-circuitados, sombreamento localizado, descasamento de parâmetros (*mismatch*) entre módulos, a presença de resistência paralela ou série excessiva (ABNT, 2014).

Para a obtenção da curva característica, é necessário que seja usada uma carga variável a fim de realizar a varredura de todos os pontos da curva. As cargas variáveis que podem ser resistiva variável, com conversor CC-CC resistivo, carga eletrônica, carga capacitiva e fontes de quatro quadrantes (ARAÚJO; LOPES; MOREIRA, 2020; ANJOS, 2019).

2.3.1 Carga Resistiva Variável

A carga resistiva variável consiste em conectar um resistor variável (potenciômetro) como carga ao módulo fotovoltaico para que se realize a varredura de todos os pontos da curva. A Figura 6 mostra a conexão do módulo fotovoltaico à resistência variável, bem como alguns pontos que foram mapeados ao variar a resistência.

Figura 6 – Curva característica obtida com variação da resistência



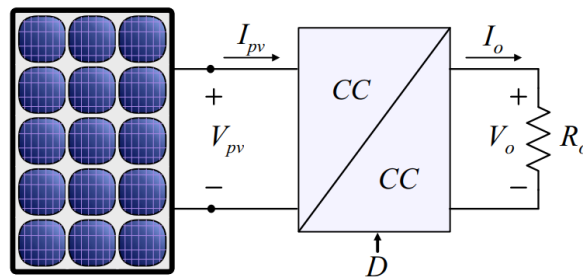
Fonte: Araújo, Lopes e Moreira (2020)

Como desvantagem, há dificuldade do resistor absorver grandes quantidades de potência, o que dificulta uso em plantas/sistemas fotovoltaicos de grande porte. (ARAÚJO; LOPES; MOREIRA, 2020; LUNA; CARVALHO, 2016).

2.3.2 Conversor CC-CC com Carga Resistiva

O conversor CC-CC com carga resistiva está relacionado com o fato que a resistência equivalente vista pelo módulo fotovoltaico é variável em função da resistência da carga acoplada na saída do conversor e de sua razão cíclica de operação. A variação da razão cíclica tem implicações que contribuem para alterar a resistência de saída, que resulta na variação da tensão de circuito aberto, e de sua corrente de curto-circuito (PEREIRA et al., 2017).

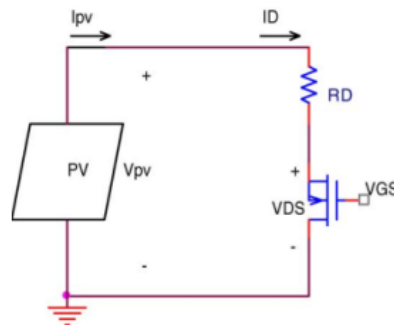
A Figura 8 mostra que o conversor CC-CC deve ser instalado entre o módulo fotovoltaico e a carga.

Figura 7 – Conexão do módulo fotovoltaico ao conversor CC-CC

Fonte: Pereira et al. (2017)

2.3.3 Carga Eletrônica

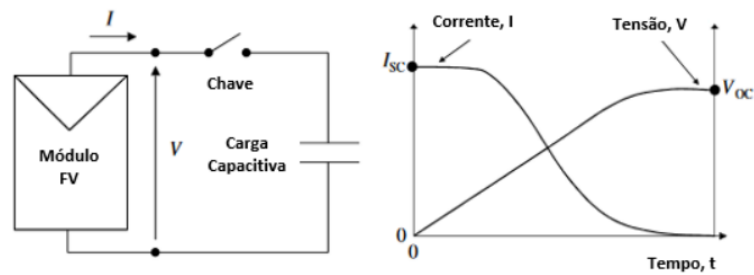
O método de carga eletrônica caracteriza-se por ser simples e flexível com relação a variação da resistência. Conectado ao módulo fotovoltaico, a carga eletrônica consiste em dispositivos semicondutores aplicados em eletrônica de potência, como os transistores, MOSFET, IGBT e BJT (ARAÚJO; LOPES; MOREIRA, 2020). A Figura 8 mostra um esquema de conexão do módulo à carga composta pelo MOSFET. A partir da variação na tensão de *gate-source* (VGS) se obtém pontos entre o transiente de abertura da chave que mapeia os pontos de curto-circuito ao circuito aberto.

Figura 8 – Conexão do módulo à carga eletrônica

Fonte: Araújo, Lopes e Moreira (2020)

2.3.4 Carga Capacitiva

O método com a carga capacitiva é a forma mais utilizada nos instrumentos traçadores de curvas IV, cujo objetivo é realizar o armazenamento da energia sem provocar variações abruptas nos terminais do módulo. As condições para obter a tensão de circuito aberto são alcançadas quando não houver corrente elétrica devido ao carregamento completo dos capacitores (ANJOS, 2019). O processo de carga do capacitor por meio do módulo e a forma de onda são apresentados na Figura 9 quando chave é fechada.

Figura 9 – Carga capacitiva e forma de ondas da tensão e corrente elétrica

Fonte: Araújo, Lopes e Moreira (2020)

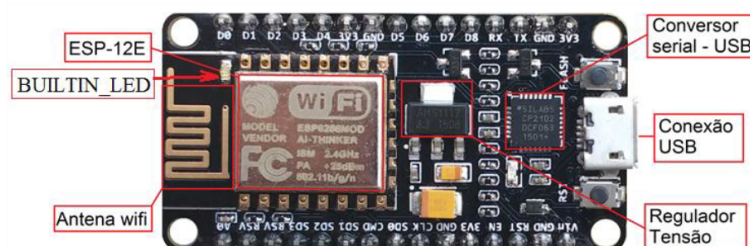
A chave aberta implica que a corrente de curto-circuito será máxima, uma vez que, o módulo fotovoltaico não fornece a tensão nos seus terminais. (ARAÚJO; LOPES; MOREIRA, 2020).

2.3.5 Fontes de Quatro Quadrantes

Este método é considerado sofisticado devido a facilidade de medir grandes quantidade de potência, além de caracterizar diversos módulos em um tempo da ordem de milissegundos. A carga ajustável consiste em uma fonte de alimentação de quatro quadrantes, que se comporta como uma resistência variável. Para um sistema fotovoltaico, o primeiro quadrante é ideal para a obtenção da curva IV (ANJOS, 2019).

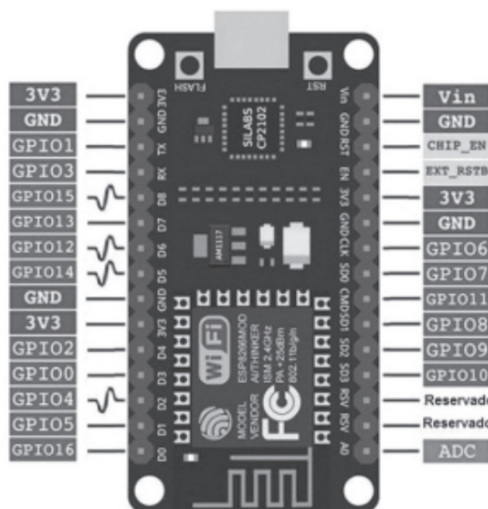
2.4 ESP8266 NodeMCU

O ESP8266 NodeMCU consiste em um módulo na forma de placa de circuito impresso, no qual são embarcados, um conversor Serial-USB e o módulo ESP12E, com um programa específico com acesso aos periféricos disponibilizados conforme Figura 10 (PEIXOTO, 2021). A Figura 11 mostra uma visão geral dos pinos disponíveis na placa.

Figura 10 – Placa de desenvolvimento ESP8266 NodeMCU

Fonte: Peixoto (2021)

A alimentação do módulo é realizada pela própria conexão USB, com uma tensão

Figura 11 – Pinos da placa de desenvolvimento ESP8266 NodeMCU

Fonte: Stevan e Farinelli (2019)

de 5 V ou por meio do pino V_{in} , para uma conexão externa. Internamente a tensão de trabalho do módulo é de 3,3 V fornecida pelo regulador de tensão AMS1117. O regulador fornece uma corrente de até 1 A, considerando que o consumo do módulo é de aproximadamente 200 mA. Recomenda-se que os periféricos conectados à placa tenham consumo de corrente menor que 500 mA para evitar danos ou mal funcionamento da placa.

O conversor Serial-USB é o responsável pela conexão com o computador, a fim de que se realize a programação do módulo ou troca de mensagens/comandos por meio do monitor. Esse conversor necessita de um *driver* específico que deve ser verificado no manual da placa para ser instalado no computador, e, assim reconhecer a conexão USB como uma porta serial do tipo COM¹ (PEIXOTO, 2021).

O bloco ESP-12E é o responsável pela comunicação Wi-Fi, além de executar uma lógica programável, uma vez que, permite embarcar o programa executor de comandos programados pelo usuário. Os pinos de Entrada/Saída de Finalidades Gerais (GPIO) permitem acessar as entradas e saídas digitais e analógicas, além de pinos para acesso a periféricos especiais, como é o caso do barramento da Interface Serial de Periféricos (SPI) que, por meio dos pinos CS (CMD), SCLK (CLK), MOSI (GPIO13) e MISO (GPIO12), promovem a comunicação serial entre o módulo e seus periféricos. O barramento do protocolo (I2C) por meio dos pinos SDA (GPIO4) e SCL (GPIO5) permite a comunicação mestre-escravo (PEIXOTO, 2021; STEVAN; FARINELLI, 2019). O Quadro 1 mostra os pinos completos do ESP8266 na ordem física, com sua respectiva descrição. E por meio do Quadro 2 realiza-se a consulta dos pinos digitais e analógico do ESP8266 que são

¹Uma porta COM é um canal de entrada ou saída que permite a conexão de um dispositivo serial a um computador.

Quadro 1 – Pinagem completa do módulo ESP8266 NodeMCU

Pino	Descrição	Pino	Descrição
A0	Entrada analógica de 10 bits (0 a 1023)	D0	Entrada ou saída digital (0 V ou 3,3 V) – GPIO16
RSV	Reservado internamente. Não deve ser usado	D1	Entrada ou saída digital (0 V ou 3,3 V) – GPIO-5, comunicação I2C, sinal SCL (Serial Clock)
RSV	Reservado internamente. Não deve ser usado	D2	Entrada digital (0 V ou 3,3 V), saída digital (0 V ou 3,3 V) ou saída PWM – GPIO4
SD3	Comunicação com cartão de memória (SDD3) – GPIO10	D3	Saída digital (0 V ou 3,3 V) – GPIO0
SD2	Comunicação com cartão de memória (SDD2) – GPIO9	D4	Saída digital (0 V ou 3,3 V), ligado ao LED Builtin montado no módulo, com lógica invertida – GPIO2
SD1	Interface SPI (MOSI) – GPIO8	3V3	Tensão de 3,3V, para uso em periférico
CMD	Interface SPI (CS) – GPIO11	GND	Tensão de referência de 0 V, para uso em periférico
SD0	Interface SPI (MISO) – GPIO7	D5	Entrada digital, saída digital ou saída PWM – GPIO14
CLK	Interface SPI (SCLK) – GPIO6	D6	Entrada digital, saída digital ou saída PWM – GPIO12
GND	Tensão de referência de 0 V, para uso em periférico	D7	Entrada ou saída digital (0 V ou 3,3 V) – GPIO13
3V3	Tensão de 3,3 V, para uso em periférico	D8	Saída digital ou saída PWM – GPIO15
EN	Habilita a inicialização do módulo	RX	Interface Serial RxD, usado para carregar o programa e disponível para uso no programa – GPIO3
RST	Reset no módulo, faz a placa reinicializar (boot)	TX	Interface Serial TxD, usado para carregamento do programa e disponível para uso no programa – GPIO1
GND	Tensão de referência de 0 V, para uso em periférico	GND	Tensão de referência de 0 V, para uso em periférico
Vin	Tensão de entrada no módulo, 5 V a 9 V	3V3	Tensão de 3,3 V, para uso em periférico

Fonte: Peixoto (2021)

configurados como entrada ou saída.

Quadro 2 – Portas de entrada e saída da placa ESP8266 NodeMCU

Pino	GPIO	Saída digital	Entrada digital	Entrada analógica	Saída PWM	Função Especial
A0	-	-	-	Sim	-	ADC10bits
D0	16	Sim	Sim	-	-	-
D1	5	Sim	Sim	-	-	-
D2	4	Sim	Sim	-	Sim	-
D3	0	Sim	-	-	-	-
D4	2	Sim	-	-	-	BUILTIN_LED
D5	14	Sim	Sim	-	Sim	-
D6	12	Sim	Sim	-	Sim	-
D7	13	Sim	Sim	-	-	-
D8	15	Sim	-	-	Sim	-

Fonte: Peixoto (2021)

Os pinos digitais e analógico não toleram uma tensão superior a 3,3 V. Caso ultrapasse o limite de tensão, o placa será danificada. A porta analógica, pino A0, possui um conversor Analógico/Digital (ADC) interno de 10 *bits* (PEIXOTO, 2021). Para este trabalho foi necessário duas portas analógicas para leitura dos valores de tensão e corrente dos módulos fotovoltaicos, mas no ESP8266 estava disponível apenas uma porta.

Para expandir o número de portas recomenda-se usar um multiplexador digital ou multiplexador analógico, que basicamente é um comutador eletrônico, no qual usa uma porta de três estados, capaz de selecionar dados de fontes alternativas provenientes de um sistema. (BATES, 2011). O uso do multiplexador não interfere significativamente na qualidade dos sinais de tensão e corrente que serão fornecidos à porta analógica do ESP8266 (MORAES; CASTRUCCI, 2010).

2.5 Sistemas de Aquisição de Dados

Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica podem ser monitorados com o próprio inversor CC/CA, uma vez que, a maioria possui função de monitoramento e aquisição de dados (PINHO; GALDINO, 2014). Para o caso de um sistema fotovoltaico isolado precisa-se de um registrador capaz de coletar e armazenar os valores dos sensores (PIOMBINI; MELO, 2018).

Os sistemas de aquisição de dados são sistemas que utilizam tecnologias de computação e comunicação para automatizar o monitoramento e o controle de processos industriais. A maioria dos ambientes industriais complexos e geograficamente isolados usam esses sistemas para coleta de informações das fontes, e posteriormente são apresentadas a um operador de forma amigável e interativa (MÜLLER, 2017).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar alguns sistemas de aquisição de dados para instalações fotovoltaicas que foram desenvolvidos nos últimos dez anos. A aquisição dos parâmetros elétricos e climáticos são realizadas em diferentes configurações de sistemas fotovoltaicos e com coletores de dados sob diferentes plataformas e sistemas microprocessados. Esses trabalhos serviram como parâmetro para a criação do sistema de monitoramento deste trabalho.

O registrador de dados desenvolvido no trabalho de Bian et al. (2012) foi implementado para monitorar plantas fotovoltaicas com diferentes capacidades e configurações de acordo o desenho da planta fotovoltaica. Especificamente na província de Gejiang (China), esse sistema foi usado na coleta das grandezas elétricas tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada de um sistema fotovoltaico instalado em telhados. Além disso, foi realizado a coleta de dados meteorológicos (irradiância, temperatura ambiente do ar, etc). Os dados coletados foram processados, apresentados e armazenados no computador por meio do programa LabView. O chip FPGA usado foi responsável por coordenar o processamento, paralelismo e monitoramento do sistema fotovoltaico em tempo real.

No trabalho de Belghith e Sbita (2014) foi desenvolvido um sistema de monitoramento e controle remoto para um sistema fotovoltaico isolado. As grandezas coletadas pela rede de sensores foram a temperatura, a irradiância, a tensão, a corrente e o estado da bateria. Esses dados posteriormente foram transmitidos por meio de mensagens de texto via telefonia móvel. O sistema de monitoramento e controle fotovoltaico foi implementado com base em um microcontrolador PIC16F877, com módulos de transmissão, central de monitoramento e com uma estação de controle. Para realizar o processamento dos dados obtidos, foi usada a plataforma LabView.

No trabalho de Willoughby, Omotosho e Aizebeokhai (2014) foi criado um traçador de curvas simples e acessível para monitoramento da curva IV dos módulos. A caracterização da curva IV foi por meio do método da resistência variável. Valores de corrente e tensão foram registradas simultaneamente com a irradiância a fim de criar um banco de dados informativo de indicadores de desempenho para o rendimento do módulo em diferentes estações e condições climáticas. Para permitir salvar os dados no computador, foi usada uma conexão USB.

No trabalho de Fuentes et al. (2014) foi elaborado com a plataforma de prototipagem Arduino (versão Uno) um sistema de monitoramento de baixo custo para registrar a tensão, a corrente, a temperatura e a irradiância geradas pelos módulos fotovoltaicos instalados na Universidade de Jaén (região sul da Espanha) em diferentes condições climáticas com um sistema fotovoltaico isolado e outro conectado à rede elétrica. O custo final do projeto desenvolvido foi avaliado em aproximadamente R\$ 404,68. Dois pontos importantes no trabalho são o elevado grau de precisão e a sintonia com os padrões descritos na norma IEC 61724 da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC).

No projeto de Tifton e Bühler (2016) foi desenvolvido um registrador de dados de baixo custo com a plataforma Arduino (versão Mega), onde foi aplicado em um sistema fotovoltaico residencial. O objetivo do projeto foi realizar uma análise da potência gerada ao longo do tempo e informar com precisão ao proprietário o comportamento do sistema fotovoltaico adquirido. Os dados foram armazenados em um cartão de memória de 4 *giga bytes* conectado ao módulo *Adafruit Data-Logger Shield* versão 1.0.

No trabalho de Luna e Carvalho (2016) foi construído um traçador de curvas IV baseado no método de carga eletrônica utilizando um MOSFET de potência como carga para o módulo. A placa de aquisição de dados composta pelo microcontrolador PIC 18F2550 foi conectada ao computador por meio de uma conexão USB para permitir o envio dos parâmetros elétricos e visualização dos pontos da curva obtida por meio de uma interface gráfica desenvolvida no programa Matlab.

A flexibilidade no armazenamento, acesso e estudo dos parâmetros elétricos pode ser obtida quando se usa um sistema de banco de dados, como foi desenvolvido no trabalho de (CHESINI; GABE, 2017), que consistiu em coletar a tensão, a corrente, a temperatura e a irradiância de uma planta fotovoltaica. Estes dados foram transmitidos via conexão sem fio, Wi-Fi, para armazenamento em um banco dados, onde poderiam ser consultados em uma página *web*¹. Para permitir acesso do Arduino ao Wi-Fi foi utilizado o módulo ESP8266 conectado ao Arduino.

No trabalho de Sarikh et al. (2017) foi desenvolvido um traçador de curvas características com base na metodologia da carga eletrônica variável composta por um MOSFET.

¹A página *web* é um documento que pode ser mostrado em um programa navegador de *internet*.

O objetivo do trabalho foi avaliar o desempenho do sistema fotovoltaico em função da temperatura e irradiância incidente. A tensão no terminal gate do MOSFET que é responsável pela varredura dos pontos da curva foi controlada pelo microcomputador Raspberry Pi. Os parâmetros elétricos medidos foram registrados em um arquivo com formato csv² por meio uma comunicação serial com o computador, e, a posteriori foram transferidos para um banco de dados.

No trabalho de Cáceres et al. (2020) foi desenvolvido um sistema de aquisição da curva característica de um módulo fotovoltaico em condições reais de operação. O processo de varredura foi baseado em uma carga capacitiva a fim de obter pelo menos 50 pontos no tempo de aquisição de aproximadamente 100 *ms* para cada medição. A tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito foram obtidas por meio de um divisor de tensão e resistor de derivação³, respectivamente.

No trabalho de Stein et al. (2020) foi construído um dispositivo capaz de monitorar as situações em que se encontravam os módulos fotovoltaicos, como o sombreamento e sujidade. A corrente contínua e corrente alternada geradas, percentual de acúmulo de sujeira, radiação solar foram correlacionadas com o objetivo de verificar o sombreamento nos módulos e verificar como isso interferia na geração do sistema fotovoltaico. Para que o usuário tivesse acesso às informações, foi desenvolvido um aplicativo para celular na qual o usuário recebia uma notificação do estado de funcionamento do sistema. O microcontrolador ESP32 foi utilizado para gerenciar e enviar as leituras dos sensores ao banco de dados. Constatou-se que a limpeza regular dos módulos proporcionou significativo rendimento nominal em comparação quando o sistema iniciou a operação.

No trabalho de Farias e Rebouças (2020) foi construído um protótipo de traçador de curvas IV para diagnóstico de problemas em módulos fotovoltaicos. O protótipo usava o método da carga resistiva, no qual os resistores de 10 *W* foram associados em série e paralelo com o objetivo de se obter uma carga variável para o módulo, e, desta forma realizar a varredura dos pontos da curva característica. Foi usado a placa de prototipagem Arduino (Uno) como unidade de regulação da resistência, leitura e processamento dos valores de tensão e corrente elétrica. O Arduino foi conectado ao computador para visualizar por meio do monitor serial os parâmetros elétricos que estavam sendo gerados.

A obtenção da curva característica no trabalho de Silva et al. (2021) foi baseada no uso de um conversor SEPIC para variação da resistência por meio do ajuste do ciclo de trabalho controlado pelo Arduino. A escolha pelo conversor SEPIC foi devido as características de desempenho propiciada como: a tensão de entrada e a tensão de saída

² *Comma Separated Values* (CSV) é um arquivo de texto simples que armazena informações de planilhas e tabelas.

³ Também conhecido como resistor *shunt*, cuja resistência é baixa e deve ser conectado em paralelo com o medidor de tensão ou corrente elétrica.

com a mesma polaridade, a corrente de entrada não é pulsante no modo de condução contínua, e melhor controle da corrente de curto-circuito devido ao uso de um capacitor de acoplamento. A tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito foram obtidas por meio de um divisor de tensão e resistor de derivação, respectivamente. O armazenamento dos dados foi concentrado em um cartão de memória embutido no coletor de dados, na qual permitiu a plotagem das curvas características dos módulos.

A estrutura para obtenção da curva característica no trabalho de González, Portalo e Calderón (2021) foi baseada no uso de dispositivo e programas de computador de código aberto. O microcomputador Raspberry Pi compõe o nível de controle da unidade de aquisição de dados e regulação da carga eletrônica, enquanto os programas do Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD) MariaDB, linguagem de programação *Python* e a plataforma Grafana executaram as tarefas de armazenamento dos dados no computador e geração da curva IV. Para obter a resistência variável foi usada uma carga eletrônica programável modelo *Prodigit 32612A*.

O traçador de curvas IV desenvolvido por Sayyad e Nasikkar (2021) foi usado para avaliar a eficiência e o estado operacional do gerador fotovoltaico conectado a uma carga super-capacitiva. Sendo que as variáveis avaliadas foram a irradiância, temperatura do módulo, tensão e corrente elétrica. Para realizar o tratamento e registro das medições foi usado o microcomputador Raspberry Pi.

A aquisição da curva característica no trabalho de Casado et al. (2022) foi obtida com auxílio de uma carga capacitiva controlada pelo microcomputador Raspberry Pi (modelo 4B). Os parâmetros elétricos do ponto de potência máxima, tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito e eficiência do módulo foram exibidos em uma interface do Mostrador de Cristal Líquido, *Liquid Crystal Display* (LCD), ou mesmo poderiam ser transmitidos para um computador para análises posteriores. A síntese dos trabalhos que foram realizados, bem como o trabalho de conclusão de curso desenvolvido é apresentada no Quadro 3.

Quadro 3 – Síntese Bibliográfica

Referência (Ano)	SM	Carga	LA	LP	TC
Bian et al. (2012)	FPGA	NA	CP	LabVIEW	USB
Belghith e Sbita (2014)	PIC16F877	NA	CP	C LabVIEW	SMS
Willoughby, Omotosho e Aizebeokhai (2014)	PIC	Resistiva	CP	C e LabVIEW	USB
Fuentes et al. (2014)	Arduino Uno	NA	CP	C++	Serial
Titton e Bühler (2016)	Arduino Mega	NA	Cartão de memória	C++	Serial
Luna e Carvalho (2016)	PIC 18F2550	Eletrônica	CP	C	USB
Chesini e Gabe (2017)	Arduino Mega	NA	Banco de dados	C++	Wi-Fi
Sarikh et al. (2017)	Raspberry Pi	Eletrônica	Arquivo csv	Python	Serial
Cáceres et al. (2020)	NUCLEO F411RE	Capacitiva	CP	C	Serial
Stein et al. (2020)	ESP32	NA	Banco de dados	C++	Wi-Fi
Farias e Rebouças (2020)	Arduino Uno	Resistiva	CP	C++	Serial
Silva et al. (2021)	Arduino Uno	Conversor SEPIC	Cartão de memória	C++	Serial
González, Portalo e Calderón (2021)	Raspberry Pi	Eletrônica	Banco de dados	Python	Wi-Fi
Sayyad e Nasikkar (2021)	Raspberry Pi	Capacitiva	Banco de dados	Python	Wi-Fi
Casado et al. (2022)	Pi	Capacitiva	CP	Python	Serial
TCC (2023)	Placa NodeMCU 1.0	Eletrônica	Banco de dados	HTML PHP, JavaScript e SQL	Wi-Fi e USB

Fonte: Autoria Própria

DESENVOLVIMENTO

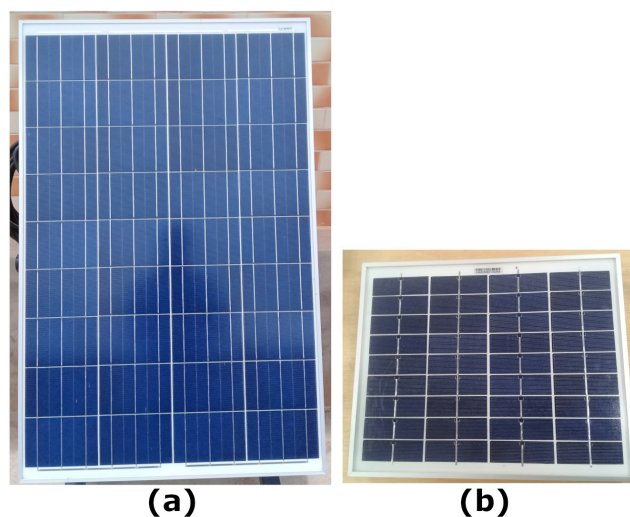
Alguns dos materiais utilizados para a construção do sistema de monitoramento estão identificados na Tabela 1, e os módulos fotovoltaicos analisados na Figura 12.

Tabela 1 – Lista de materiais

Dispositivo	Quantidade	Dispositivo	Quantidade
ESP8266 NodeMCU 1.0	1	Potenciômetros	-
AOP AD620	1	Resistores	-
AOP LM324	1	Capacitores	-
MOSFET IRFP064N	1	Diodo	-
CI ULN2003A	1	Módulo ADC	1

Fonte: Autoria Própria

Figura 12 – Módulos fotovoltaicos para monitoramento



Fonte: Autoria Própria

Por meio das Tabelas 2 e 3 são verificados os parâmetros elétricos dos módulos fotovoltaicos apresentados na Figura 12-a e Figura 12-b, respectivamente.

Tabela 2 – Módulo fotovoltaico de 95 W

Descrição	Valor
Quantidade	4
Dimensões	66 cm x 110 cm
Potência	95 W
Tensão nominal	18,2 V
Tensão de circuito aberto	22,5 V
Corrente nominal	5,23 A
Corrente de curto-circuito	5,59 A

Fonte: Autoria Própria

Tabela 3 – Módulo fotovoltaico de 10 W

Descrição	Valor
Quantidade	2
Dimensões	35 cm x 28,5 cm
Potência	10 W
Tensão nominal	17,1 V
Tensão de circuito aberto	21,2 V
Corrente nominal	0,58 A
Corrente de curto-circuito	0,62 A

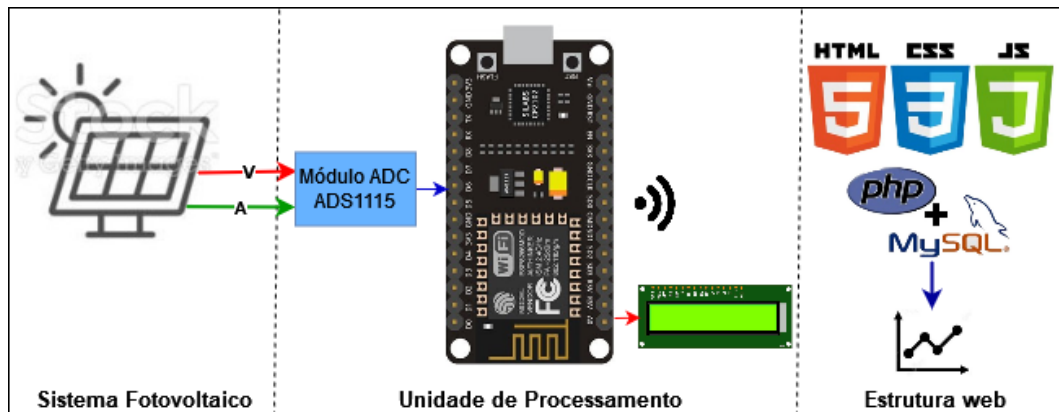
Fonte: Autoria Própria

4.1 Unidade de Processamento

A Figura 13 apresenta uma visão geral do sistema de monitoramento, no qual tem a placa de desenvolvimento ESP8266 NodeMCU como unidade que coordena as leituras de tensão e corrente elétrica do sistema fotovoltaico, que posteriormente serão enviadas ao banco de dados por meio de uma conexão Wi-Fi. Os gráficos da tensão, corrente e curva característica serão exibidos em uma página *web* desenvolvida com as linguagens de programação HTML, CSS, JavaScript e PHP. O LCD exibe a tensão e a corrente elétrica geradas pelos módulos fotovoltaicos.

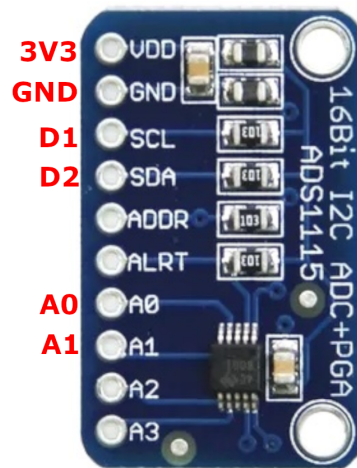
Uma das limitações encontradas no ESP8266 é a única porta analógica. Para superar esta limitação, foi usado um módulo ADC ADS1115 que possui quatro canais analógicos, com resolução de 16 *bits* cada um. O ESP8266 e o módulo conversor se comunicam por meio do barramento I2C. A Figura 14 mostra a representação de como foi realizada a conexão do módulo ADC aos pinos de alimentação e aos pinos digitais D1 e D2 do ESP8266, que realizam o controle do barramento. Os pinos A0 e A1 são reservados para as conexões utilizadas pelos sensores de tensão e corrente, respectivamente.

Figura 13 – Visão geral do sistema de monitoramento



Fonte: Autoria Própria

Figura 14 – Conexão do módulo ADC ao ESP8266

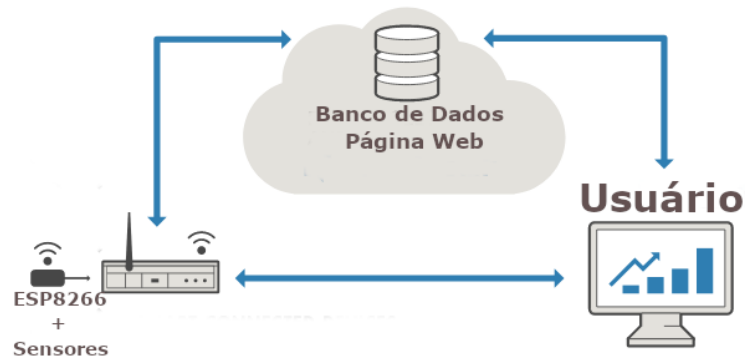


Fonte: Autoria Própria

4.2 Configuração do Banco de Dados

O armazenamento dos valores de tensão e corrente elétrica foi realizado no banco de dados relacional *MySQL* hospedado no servidor disponível na *internet*. A Figura 15 mostra uma visão geral de como os dados coletados foram enviados ao servidor *web* por meio da conexão Wi-Fi. O ESP8266 é a unidade responsável pelo processamento dos cálculos e envio das grandezas elétricas ao banco de dados, que uma vez armazenadas permite que o usuário visualize por meio de uma página *web* os gráficos da tensão, corrente, e curva característica dos módulos fotovoltaicos.

Para criação da tabela do banco de dados foi usado o comando da Linguagem de Consulta Estruturada (SQL) conforme mostra a Figura 16. A Figura 17 mostra a estrutura da tabela responsável pelo armazenamento dos valores da tensão e corrente elétrica lidos pelos sensores. A tabela do banco de dados é composta por colunas cuja

Figura 15 – Envio das grandezas elétricas para o banco de dados *MySQL*

Fonte: Autoria Própria

designação refere-se ao tipo de dado que é armazenado, como:

Figura 16 – Criação da tabela no banco de dados *MySQL*

```

1 CREATE TABLE tb_medidas_coletor(
2     id INT UNSIGNED NOT NULL AUTO_INCREMENT,
3     tensao FLOAT,
4     corrente FLOAT,
5     data_hora DATETIME,
6     PRIMARY KEY (id)
7 );

```

Fonte: Autoria Própria

- **id:** É um registro que permite identificar cada leitura. Observa-se que ao lado encontra-se o ícone de uma chave cujo significado é de chave-mestra, que é um valor irrepitível e com incremento de 1 unidade a cada registro no banco de dados;
- **tensao:** Registro que armazena os valores da tensão elétrica recebidos do coletor de dados;
- **corrente:** Registro que armazena os valores da corrente elétrica recebidos do coletor de dados;
- **data_hora:** Esse registro armazena a data e a hora que determinada leitura foi realizada pelo coletor de dados.

A rotina desenvolvida na linguagem de programação PHP apresentada na Figura 18 é utilizada para acessar o banco de dados e inserir os dados que são coletados pelo ESP8266, e posteriormente são mostrados em uma página *web*. A conexão do ESP8266 à rede Wi-Fi foi configurada de acordo o fluxograma apresentado na Figura 19, que deve-se informar os parâmetros do nome da rede Wi-Fi e a senha.

Figura 17 – Visualização da estrutura da tabela criada no banco de dados *MySQL* por meio da ferramenta *phpMyAdmin*

#	Name	Type	Collation	Attributes	Null	Default	Comments	Extra	Action
<input type="checkbox"/>	1	id		UNSIGNED	No	None		AUTO_INCREMENT	Change Drop More
<input type="checkbox"/>	2	tensao			Yes	NULL			Change Drop More
<input type="checkbox"/>	3	corrente			Yes	NULL			Change Drop More
<input type="checkbox"/>	4	data_hora			Yes	NULL			Change Drop More

Fonte: Autoria Própria

Figura 18 – Rotina para conexão ao banco de dados *MySQL*

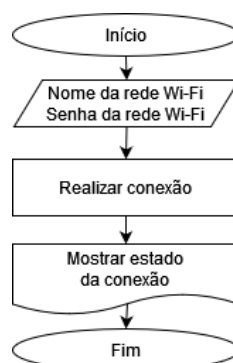
```

1  <?php
2  define ('HOSTNAME', 'localhost');
3  define ('USERNAME', 'usuario_banco_dados');
4  define ('PASSWORD', 'senha_banco_dados');
5  define ('DATABASE', 'nome_do_banco_dados');
6  define ('CHARSET', 'utf8');
7
8  //Abre uma nova conexao com o servidor
9  $con = new mysqli(HOSTNAME, USERNAME, PASSWORD, DATABASE);
10
11 if ($con -> connect_error)
12 {
13     echo ("[ERROR] Conexao falhou: " . $con -> connect_error);
14 }
15 else
16 {
17     echo "Conectado ao banco de dados MySQL.";
18 }
19 ?>

```

Fonte: Autoria Própria

Figura 19 – Configuração da rede Wi-Fi



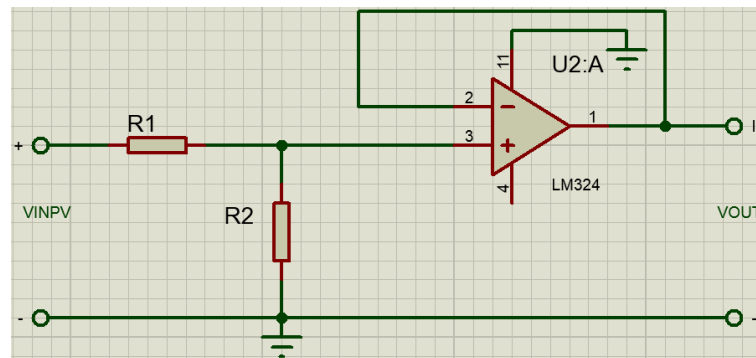
Fonte: Autor

4.3 Módulo do Voltímetro

O voltímetro projetado para medições no sistema fotovoltaico não deve ultrapassar o limite de tensão suportado pela porta analógica do módulo ADC, que é de 3,3 V. Uma das formas mais simples de conversão para a tensão máxima permitida é por meio de um

circuito divisor de tensão. Esse divisor de tensão consiste em dois resistores em série, no qual o ESP8266 irá monitorar a tensão em um deles. Por meio do circuito divisor de tensão obtém-se uma tensão na saída proporcional à tensão de entrada no pino analógico do ESP8266. Com dois resistores (R_1 e R_2) conectados em série, a tensão de entrada do módulo/sistema fotovoltaico, V_{INPV} , foi aplicada em R_1 , e o segundo terminal de R_2 foi conectado ao terra. A tensão V_{INPV} é aplicada ao longo das duas resistências e a tensão de saída, (V_{OUT}), deve ser medida em paralelo com a resistência de menor valor conforme exposta para Figura 20.

Figura 20 – Circuito divisor de tensão com condicionador de tensão



Fonte: Autoria Própria

Na saída do divisor de tensão foi conectado o Amplificador Operacional (AOP) LM324 para realizar o condicionamento do sinal de tensão elétrica. O circuito elétrico composto pelo divisor de tensão é chamado seguidor de tensão (ou amplificador de ganho unitário), pois a tensão de saída é igual a tensão de entrada. Essa configuração apresenta uma impedância de entrada muito alta e, dessa forma, é útil como um amplificador de estágio intermediário para isolar o circuito do sistema fotovoltaico e o circuito do ESP8266. O seguidor de tensão minimiza a interação entre os dois estágios e elimina o efeito de carga entre estágios (ALEXANDER; SADIKU, 2013). A análise do circuito da Figura 20, permitiu obter a equação (5) que representa o circuito do divisor de tensão.

$$V_{OUT} = V_{INPV} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

Os módulos fotovoltaicos apresentados na Tabela 2 foram conectados em série a fim de obter a mesma corrente nominal, e que a tensão total do sistema fotovoltaico fosse igual o produto da tensão nominal de um módulo pela quantidade. A tensão de circuito aberto do módulo da Tabela 2 foi usada como referência para dimensionamento dos resistores R_1 e R_2 da equação (5). Como a quantidade de módulos fotovoltaicos de 95 W é igual a quatro, com uma tensão de circuito aberto de 22,5 V cada um, resultou em uma tensão total de $V_{INPV} = 90$ V. Os resistores R_1 e R_2 são calculados de tal forma que a tensão sobre R_2 seja próxima (não deve ultrapassar) dos 3,3 V quando a tensão

de entrada for igual a tensão total. O módulo ADC de 16 *bits* realiza a conversão dessa tensão que varia de 0 a 3,3 V em valores digitais que variam de 0 a 65535 ($2^{16} - 1$). O rearranjo da equação (5) resulta na relação de resistências mostrada na equação (6).

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{V_{INPV}}{V_{OUT}} - 1 \quad (6)$$

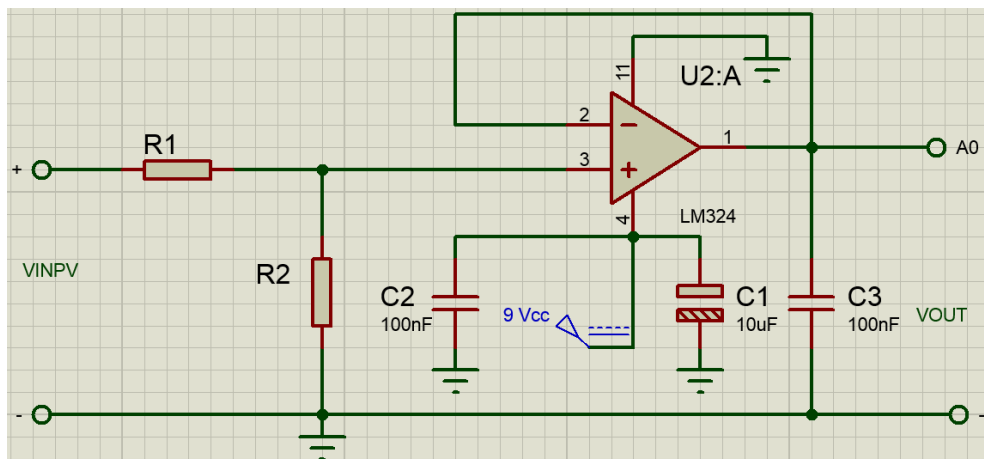
Com $V_{INPV} = 90 \text{ V}$ e $V_{OUT} = 3,3 \text{ V}$ sendo aplicados na equação (6), obtém-se a relação das resistências:

$$\frac{R_1}{R_2} = 26,27 \approx 26,30 \quad (7)$$

Para $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, obteve-se o valor calculado para R_1 , que é igual a $263 \text{ k}\Omega$. Para obter esse valor de resistência foi usado um potenciômetro de $500 \text{ k}\Omega$ (modelo 3006P).

A folha de dados do AOP LM324 indica que este circuito integrado pode ser alimentado com uma fonte simples (TEXAS INSTRUMENTS, 2015). Assim, dispensa-se o uso de uma fonte simétrica, e além disso, reduz-se o tamanho final do coletor de dados. Os capacitores para desacoplamento são de uso opcional nas simulações, todavia a montagem dos capacitores na prática permite que o AOP seja alimentado com uma tensão estável, sem variações bruscas que possam afetar seu desempenho. Após o dimensionamento dos resistores e considerações, obteve-se o circuito do voltímetro mostrado na Figura 21. A fim de obter uma tensão estável na porta A0 do módulo ADC, foi utilizado um capacitor de 100 nF na saída do AOP.

Figura 21 – Circuito elétrico do voltímetro



Fonte: Autoria Própria

Após o condicionamento de sinal, o ESP8266 deve realizar os cálculos para determinar a tensão que foi gerada pelo sistema fotovoltaico. O rearranjo da equação (5) permite calcular essa tensão gerada:

$$\frac{V_{INPV}}{V_{OUT}} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (8)$$

que resolvendo em termos das resistências, obteve-se o resultado:

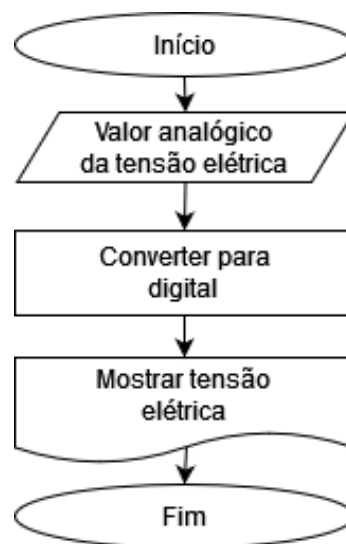
$$V_{INPV} = 27,3 \cdot V_{OUT} \quad (9)$$

na qual tensão V_{OUT} é calculada pela equação (10):

$$V_{OUT} = \frac{(3,3 \text{ V}) \cdot v_d}{65536} \quad (10)$$

em que: $3,3 \text{ V}$ é a maior tensão que pode ser lida pela porta analógica do módulo ADC, e a variável v_d é a tensão na saída do AOP LM324 que será discretizada pelo ADC no intervalo de 0 a 65535. A Figura 22 mostra o fluxograma de obtenção da tensão elétrica que é discretizada pelo módulo ADC e pelo ESP8266 para ser apresentada no LCD e na página *web*.

Figura 22 – Fluxograma para cálculo da tensão elétrica gerada



Fonte: Autoria Própria

4.4 Módulo do Amperímetro

A corrente elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico é obtida de forma indireta, ou seja, necessita-se que a tensão elétrica e a resistência na equação da Lei de Ohm sejam conhecidas:

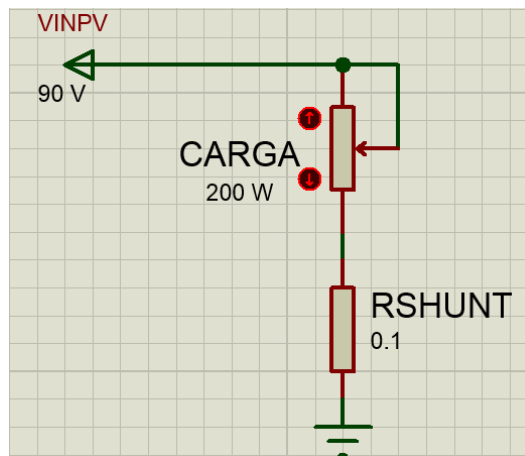
$$V = Ri \quad (11)$$

Para que a medição da corrente não seja influenciada pela resistência foi necessário usar um resistor de derivação de $0,1 \Omega$ conectado em série com a carga, que é de 200 W . A escolha da carga usada para obtenção da curva característica de um módulo fotovoltaico foi orientada pelo critério de que a potência do módulo fotovoltaico deve ser menor que

a potência nominal de dissipação da carga. A potência total do sistema fotovoltaico de 380 W foi definida como sendo o produto dos quatro módulos da Tabela 2 pela sua respectiva potência.

A Figura 23 apresenta o circuito básico usado para obtenção da corrente elétrica. Deve ser avaliado com os testes em campo se a resistência variável é adequada para mapeamento dos pontos da curva característica. Outro ponto que deve ser verificado nos testes na matriz de contatos para obtenção da curva IV de um módulo fotovoltaico é que a resistência da carga variável não pode assumir valores menores que façam com que a queda de tensão sobre o resistor R_{shunt} seja grande o suficiente na saída do amplificador de instrumentação, e venha a causar danos irreparáveis a porta analógica do ESP8266 que tem um limite de 3,3 V.

Figura 23 – Circuito básico do amperímetro



Fonte: Autoria Própria

Como os resistores estão em série, a corrente será a mesma. Obtendo a diferença de potencial entre os terminais de R_{carga} e R_{shunt} obtém-se essa corrente por meio da equação (11), uma vez que a resistência é conhecida. A fim de dimensionar o circuito do amperímetro, foi usada a Equação 12 para determinar a corrente elétrica que percorre a carga eletrônica e o resistor *shunt*.

$$P = VI \quad (12)$$

A tensão máxima de 90 V produzida pelo sistema fotovoltaico produz na carga de 200 W e no resistor R_{shunt} uma corrente de:

$$I_{shunt} = 2,22 \text{ A}$$

Essa corrente gera uma queda de tensão no resistor *shunt* de:

$$V_{shunt} = 222,22 \text{ mV}$$

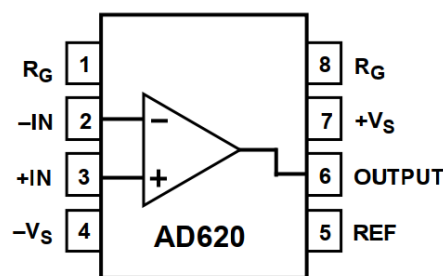
Para verificar se o módulo ADC consegue realizar a leitura da tensão obtida V_{shunt} , deve-se verificar o valor mínimo de tensão permitido em uma porta analógica com 16 *bits* de resolução e tomando 3,3 V como referência.

$$res = \frac{V_{CC}}{2^{16}} = \frac{3,3 \text{ V}}{65536} = 0,05 \text{ mV} \quad (13)$$

Observa-se que pelo valor de V_{shunt} obtido, a porta analógica do módulo ADC consegue detectar essa tensão. Todavia, dependendo das condições climáticas e irradiância a corrente elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos pode ser menor, além disso para determinar a queda de tensão no resistor R_{shunt} foi usada a corrente máxima. Consequentemente essa queda de tensão pode ser menor e deste modo é necessário amplificar esse sinal para permitir a leitura e também aumentar a precisão nas medições. Para amplificação do sinal de tensão foi usado o amplificador de instrumentação AD620.

O AD620 é um CI que pode ser alimentado com uma fonte simples ou simétrica. Este CI possui um amplificador de instrumentação constituído de três amplificadores internos. O AD620 oferece flexibilidade, uma vez que permite o ajuste de ganho com um resistor externo. Sem resistência externa, o AD620 é configurado para ganho unitário ($G = 1$), e com uma resistência externa, o AD620 pode ser ajustado para ganhos de até 10000 (ANALOG DEVICES, 2011). O diagrama de conexão e as descrições dos pinos são mostrados na Figura 24 e no Quadro 4, respectivamente.

Figura 24 – Diagrama de conexões do AD620



Fonte: ANALOG DEVICES (2011)

A folha de dados do AD620 informa que para calcular o resistor de ganho específico, R_G deve-se usar a equação (14) (ANALOG DEVICES, 2011):

$$R_G = \frac{49,4 \text{ k}\Omega}{G - 1} \quad (14)$$

Quadro 4 – Descrição dos pinos do AD620

Pino	Descrição	Pino	Descrição
1	Resistor de ganho	8	Resistor de ganho
2	Entrada inversora	7	Alimentação positiva
3	Entrada não-inversora	6	Saída
4	Alimentação negativa (ou GND)	5	Referência (ou GND)

Fonte: Autoria Própria

Em que G é o ganho calculado conforme a equação (15):

$$G = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad (15)$$

Na qual V_{IN} é a queda de tensão no resistor R_{shunt} , e V_{OUT} é a tensão suportada pela porta analógica do módulo ADC. Com $V_{shunt} = 222,22 \text{ mV}$ e $V_{OUT} = 3,3 \text{ V}$, resulta que o ganho calculado foi de:

$$G = 15$$

Com esse valor de ganho, obteve-se o valor do resistor R_G :

$$R_G = 3528,57 \Omega \approx 3529 \Omega$$

Esse valor de resistência foi obtido por meio de um potenciômetro de $500 \text{ k}\Omega$ (modelo 3006P). Segundo a folha de dados do AD620, a fonte de alimentação pode ser simétrica ou simples. Uma recomendação indicada é que deve ser inseridos capacitores de desacoplamento em paralelo com a fonte de alimentação para evitar oscilações abruptas que afete o CI e as medições (ANALOG DEVICES, 2011). O circuito final para o amperímetro é mostrado na Figura 25 e a Figura 26 mostra o fluxograma de obtenção da corrente elétrica, por meio da equação (11), para ser apresentada no LCD e na página *web*.

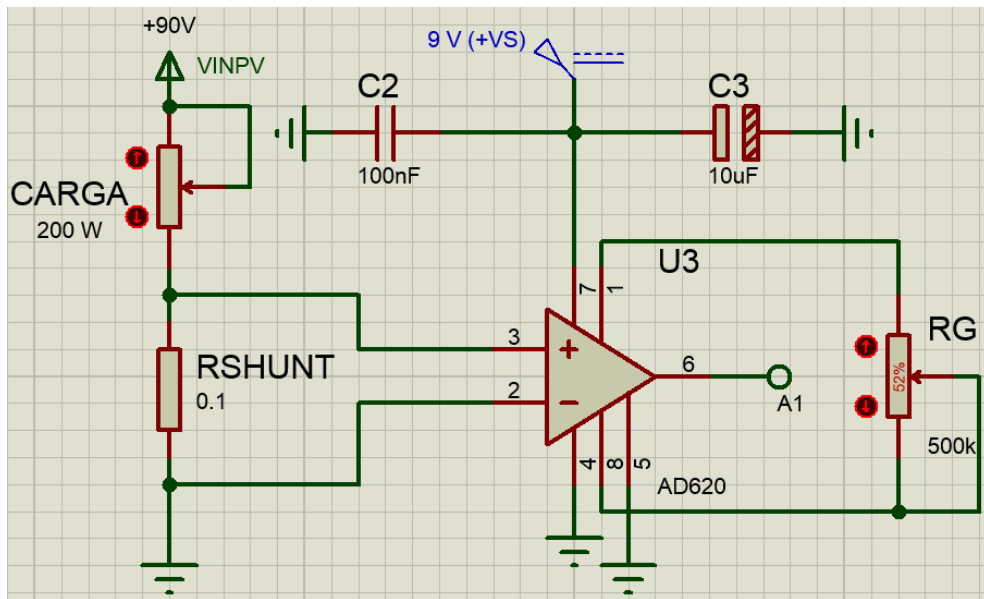
4.5 Carga Variável

Como carga variável foi usada uma carga eletrônica, que é composta por dois estágios: estágio de potência e estágio de comando, conforme mostra a Figura 27.

4.5.1 Estágio de Potência

No estágio de potência foi utilizado o MOSFET IRFP064N, que por meio do Quadro 5 verifica-se seus limites de operação.

Figura 25 – Circuito elétrico do amperímetro



Fonte: Autoria Própria

Figura 26 – Fluxograma para cálculo da corrente elétrica gerada



Fonte: Autoria Própria

Quadro 5 – Características elétricas do MOSFET IRFP064N

Parâmetro	Valor
V_{DS}	55 V
V_{GS}	± 20 V
I_{DM}	110 A
R_{DS}	0,008 Ω
P_D	200 W

Fonte: Autoria Própria

4.5.2 Estágio de Comando

O estágio de comando tem o circuito integrado ULN2003A, que é utilizado como interface para fornecimento de tensão ao terminal *gate* do MOSFET IRFP064N. O controle

da tensão é realizada pela porta digital D3 do ESP8266 da seguinte forma:

- D3 em nível lógico baixo implica em carregar o capacitor C_1 por meio do resistor R_1 e do diodo D;
- D3 em nível lógico alto implica em descarregar o capacitor C_1 por meio dos resistores R_2 e R_3 .

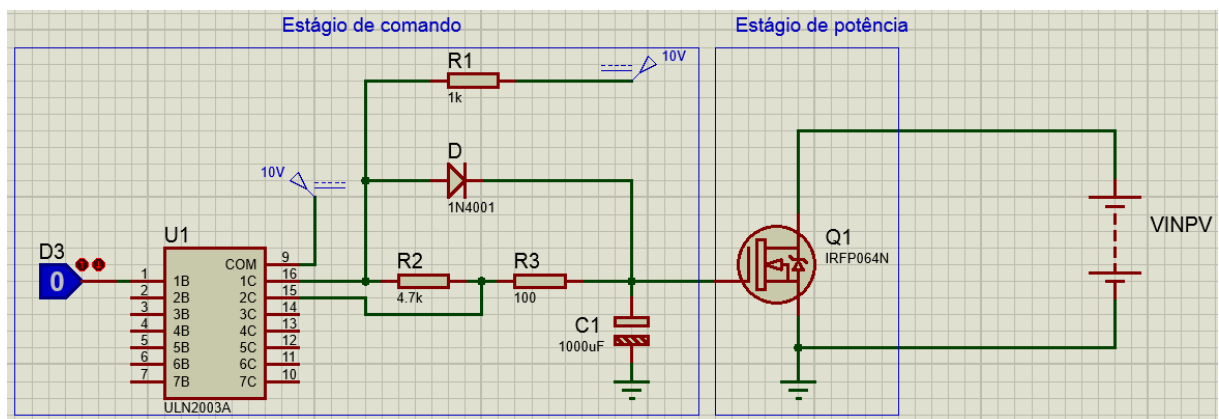
O processo de carregamento e descarregamento do capacitor faz com que sejam obtidos os pontos de V_{OC} e I_{SC} da curva característica do módulo fotovoltaico. O tempo em que o capacitor é carregado ou descarregado é expresso em termos da constante de tempo do circuito RC conforme mostra a equação (16).

$$\tau = RC \quad (16)$$

em que,

- R - resistência equivalente
- C - capacitor

Figura 27 – Circuito elétrico da carga eletrônica



Fonte: Adaptada de Sadarjoshi e Usha (2016)

4.6 Interface Humano-Máquina

A fim de exibir os dados gerados pelos módulos fotovoltaicos, foi desenvolvida uma Interface Humano-Máquina (IHM). A IHM é composta por um LCD de 16x2, que é capaz de exibir 16 caracteres em cada uma das 2 linhas. O LCD é composto pelos pinos:

- VSS, VCC (ou VDD) e GND: Pinos de alimentação;

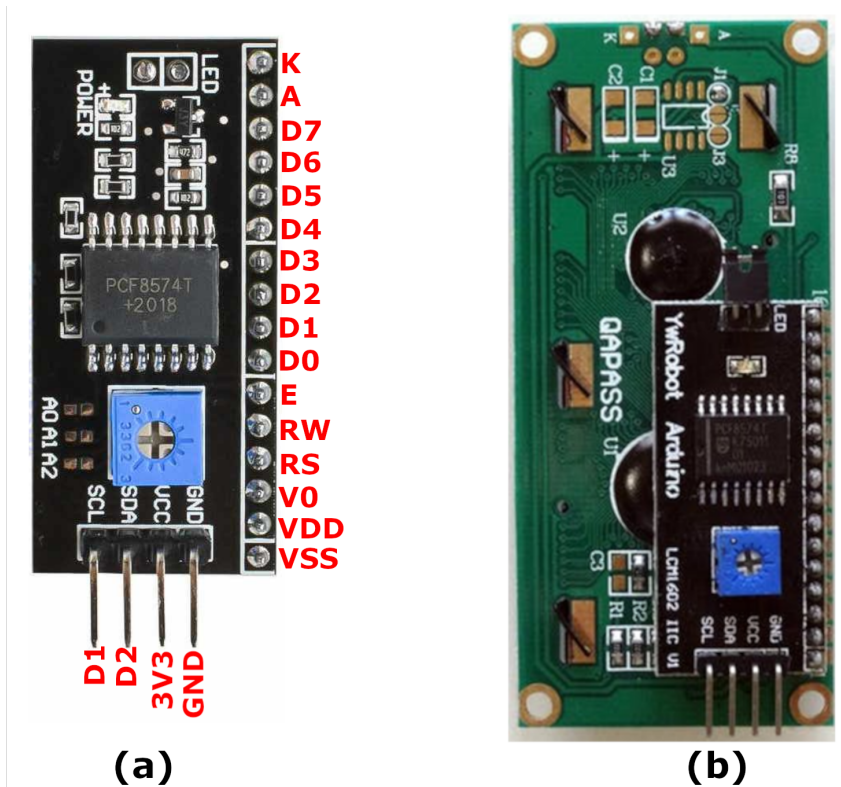
- V0 (ou VEE): Ajuste de contraste do LED por meio de um potenciômetro;
- *Register Select* (RS): Controla a parte da memória que é reservada para escrita de dados. Um dado pode ser escrito para ser mostrado na tela, ou escrever uma instrução no microcontrolador HD44780 embutido no LCD;
- *Read/Write* (R_{LCD}/W_{LCD}): Seleção do modo leitura ou escrita;
- *Enable* (E): Habilita a escrita de dados nos registradores do microcontrolador HD44780;
- D0-D7: Os estados de cada um desses pino corresponde aos *bits* que estão sendo escritos em um registrador do microcontrolador HD44780, ou os valores lidos a partir de um registrador quando está no modo de leitura;
- A: Anodo do LED de iluminação;
- K: Catodo do LED de iluminação.

Para usar o mínimo de pinos digitais do ESP8266, o LCD foi acoplado a um módulo serial I2C conforme mostra a identificação da Figura 28. Com esse módulo, foi realizado o controle da escrita dos caracteres no LCD por meio dos pinos digitais D1 e D2 do ESP8266. A Figura 29 mostra o circuito básico do sistema de medição. A curva característica será gerada com auxílio das linguagens de programação *HTML*, *PHP*, *CSS* e *JavaScript*.

Com os circuitos definidos, foram realizados testes na matriz de contatos e construção das placas de circuitos impressos usando o método de transferência térmica dos circuitos elétricos para as placas de fenolite, conforme mostra a Figura 30. Por meio da Figura 31 verifica-se a montagem do coletor de dados em uma caixa de uso geral, a fim de garantir a proteção dos circuitos elétricos. A alimentação do ESP8266 foi realizada por meio da conexão USB com o computador. Para a alimentação dos instrumentos de medidas foi utilizada uma fonte de alimentação de 10 V, sendo observado um baixo consumo de corrente elétrica pelos circuitos.

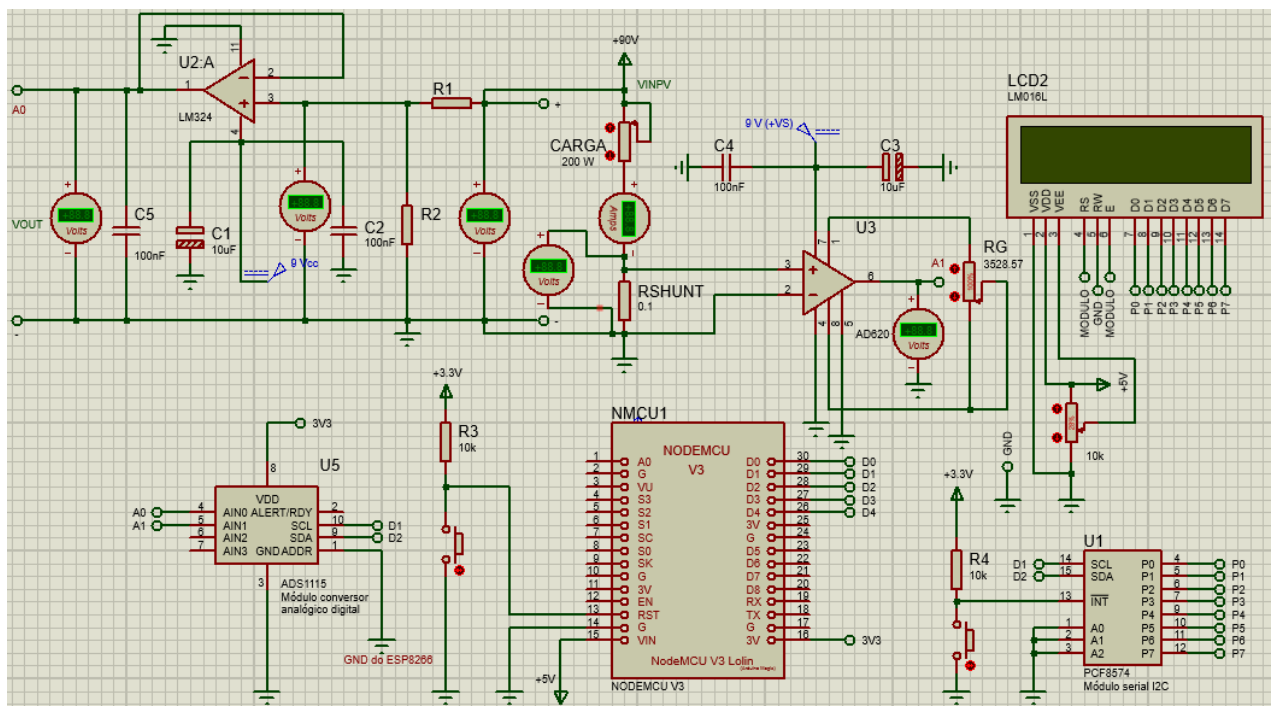
Uma visão geral do algoritmo responsável pelas medições das grandezas elétricas e envio dos dados à base de dados é apresentado no fluxograma da Figura 32. As entradas analógicas de tensão elétrica, corrente elétrica e a data de realização das medições são processadas pelo ESP8266 a fim de serem enviadas ao banco de dados por meio da conexão Wi-Fi.

Figura 28 – Acoplamento do módulo serial I2C ao LCD: (a) conexão dos pinos do LCD, (b) vista da parte inferior do LCD conectado ao módulo serial I2C



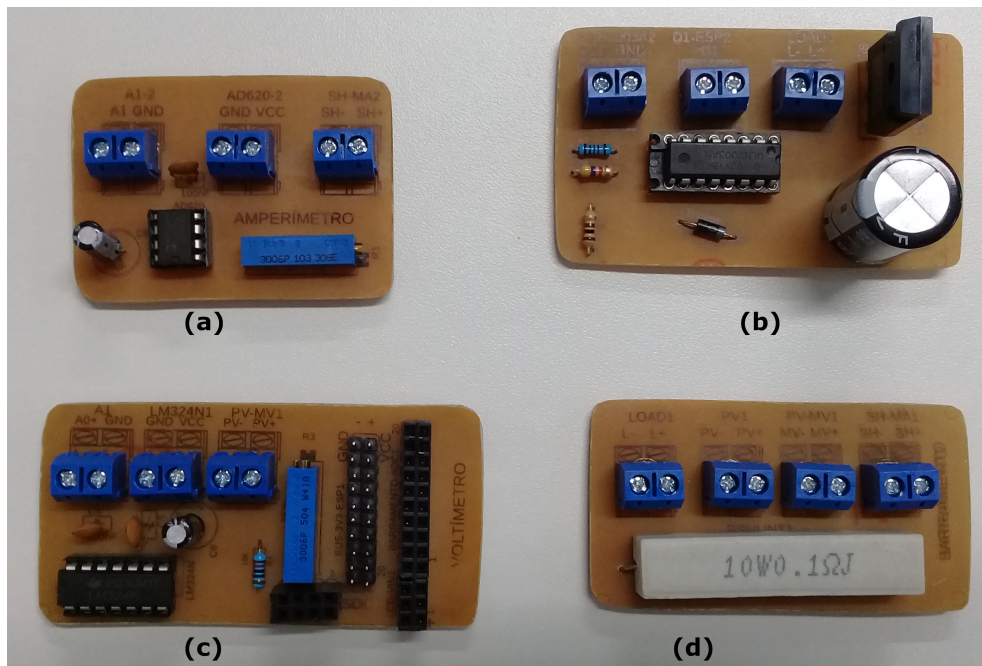
Fonte: Autoria Própria

Figura 29 – Circuito elétrico básico para medição da tensão elétrica e corrente elétrica



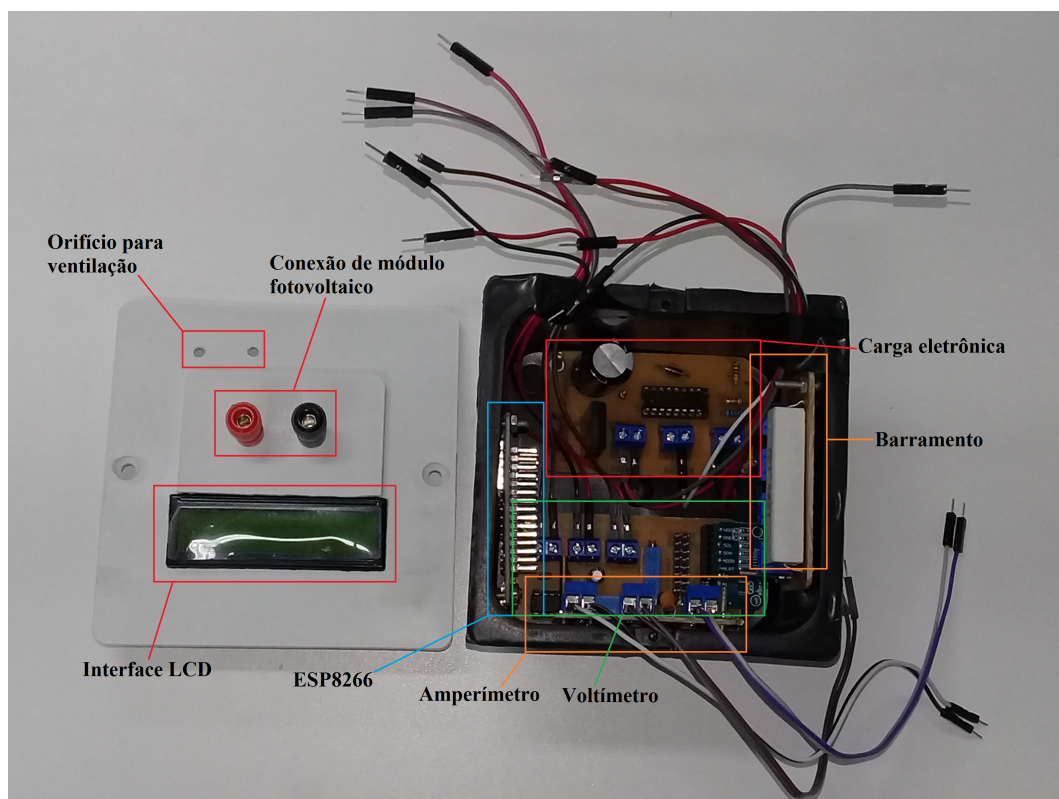
Fonte: Autoria Própria

Figura 30 – Placas de circuitos impressos produzidas: (a) amperímetro, (b) carga eletrônica, (c) voltímetro, (d) barramento para conexão do amperímetro, voltímetro e carga eletrônica

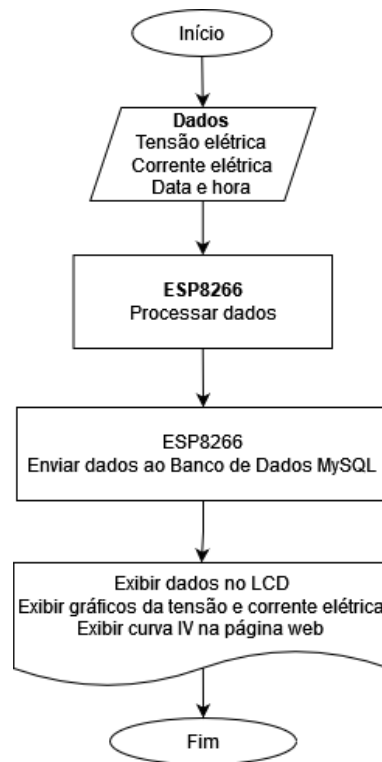


Fonte: Autoria Própria

Figura 31 – Coletor de dados desenvolvido



Fonte: Autoria Própria

Figura 32 – Fluxograma do algoritmo do sistema de monitoramento

Fonte: Autoria Própria

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo destina-se a apresentar os resultados que foram obtidos por meio da simulação, uma vez que serviram como parâmetro para validação dos circuitos elétricos que foram desenvolvidos. Outros pontos importantes deste capítulo são os dados coletados nos módulos fotovoltaicos.

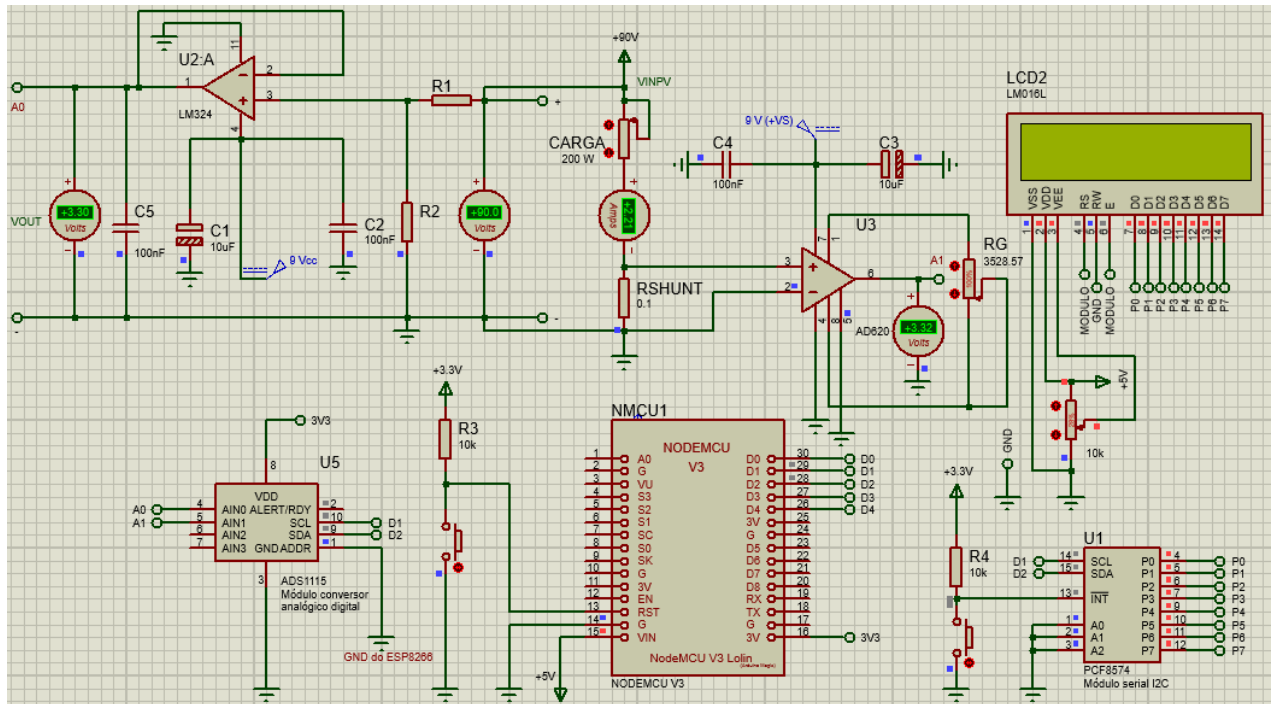
5.1 Simulação dos Circuitos Elétricos

Devido uma limitação do programa Proteus em não ter recursos que permitissem o armazenamento da tensão elétrica e corrente elétrica, a simulação foi realizada somente com o voltímetro e o amperímetro digitais, na qual foi atestado que os circuitos elétricos do coletor de dados estavam funcionando e que foram dimensionados corretamente. A parte tocante ao envio das grandezas elétricas ao banco de dados e a geração dos gráficos da tensão elétrica, corrente elétrica e da curva característica foram obtidos na montagem física do sistema de monitoramento.

Na Figura 33 é apresentado o circuito de medição em funcionamento. A biblioteca do ESP8266 no programa Proteus não tem disponível a opção para carregar o código binário que foi programado na Linguagem de Programação C++ usando o ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino, a fim de exibir os dados no LCD. Dessa forma, as grandezas elétricas são apresentadas somente por meio dos instrumentos de medição disponíveis no programa Proteus.

Conforme mostra o voltímetro na saída V_{OUT} , a tensão obtida é de 3,30 V de acordo com os cálculos realizados para evitar danos ao módulo ADC. A corrente elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico foi obtida de forma indireta por meio da equação (11),

Figura 33 – Simulação do circuito elétrico dos instrumentos de medida



Fonte: Autoria Própria

uma vez que obteve-se a tensão elétrica na saída do AOP AD620:

$$I_{SF} = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} \quad (17)$$

O valor de V_{shunt} está relacionado com a tensão V_{AD620} na saída do AOP AD620 com o seu ganho:

$$V_{shunt} = \frac{V_{AD620}}{G} \quad (18)$$

A equação (17) foi reescrita como:

$$I_{SF} = \frac{V_{AD620}}{G \cdot R_{shunt}} \quad (19)$$

Para o resultado da simulação apresentada na Figura 33 $V_{AD620} = 3,32 \text{ V}$, o que resulta numa corrente gerada pelo sistema fotovoltaico igual a:

$$I_{SF} = \frac{3,32 \text{ V}}{15 \cdot 0,1 \Omega} = 2,21 \text{ A} \quad (20)$$

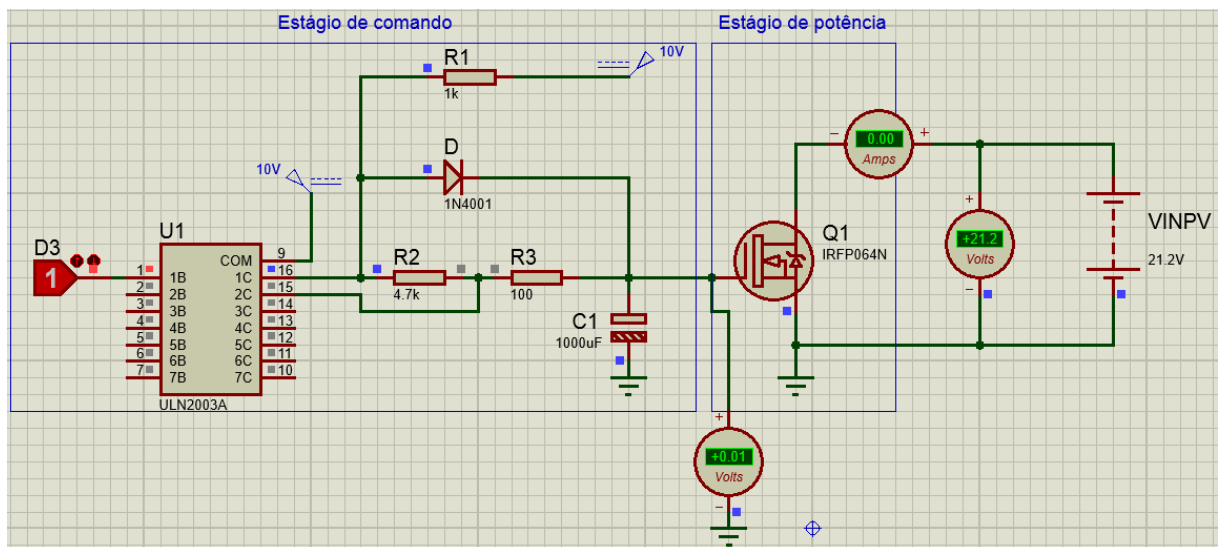
Esse valor calculado comprova que o circuito elétrico para o amperímetro foi dimensionado corretamente. As Figuras 22 e 26 sintetizam que a codificação realizada no ESP8266 executa o processo de discretizar as grandezas analógicas das portas A0 e A1 e apresentá-

las no LCD, bem como por meio de gráficos conforme foi estabelecido no fluxograma da Figura 32.

Por meio das Figuras 34 e 35 são apresentadas as sequências para a obtenção das curvas IV, tendo como exemplo o módulo fotovoltaico de 10 W. Quando o monitoramento do módulo fotovoltaico foi iniciado, o pino D3 estava em nível lógico baixo. Isso implicou que o capacitor C1 estivesse totalmente carregado, resultando nos valores mínimo e máximo para a V_{OC} e a I_{SC} , respectivamente. Os demais pontos da curva IV foram gerados quando o pino D1 foi definido com nível lógico alto. À medida que o capacitor descarregava, os valores da V_{OC} e I_{SC} foram incrementados e decrementados, respectivamente, de acordo a Figura 34.

Para reiniciar o processo de obtenção de uma nova curva IV, o pino D3 retornava para o nível lógico baixo. Isso implicou no carregamento do capacitor e conseqüentemente aumento e diminuição da I_{SC} e V_{OC} , respectivamente, conforme mostra a Figura 35. A simulação apresentou uma prévia do funcionamento dos circuitos elétricos responsáveis pelas medições da tensão elétrica e corrente elétrica dos módulos fotovoltaicos.

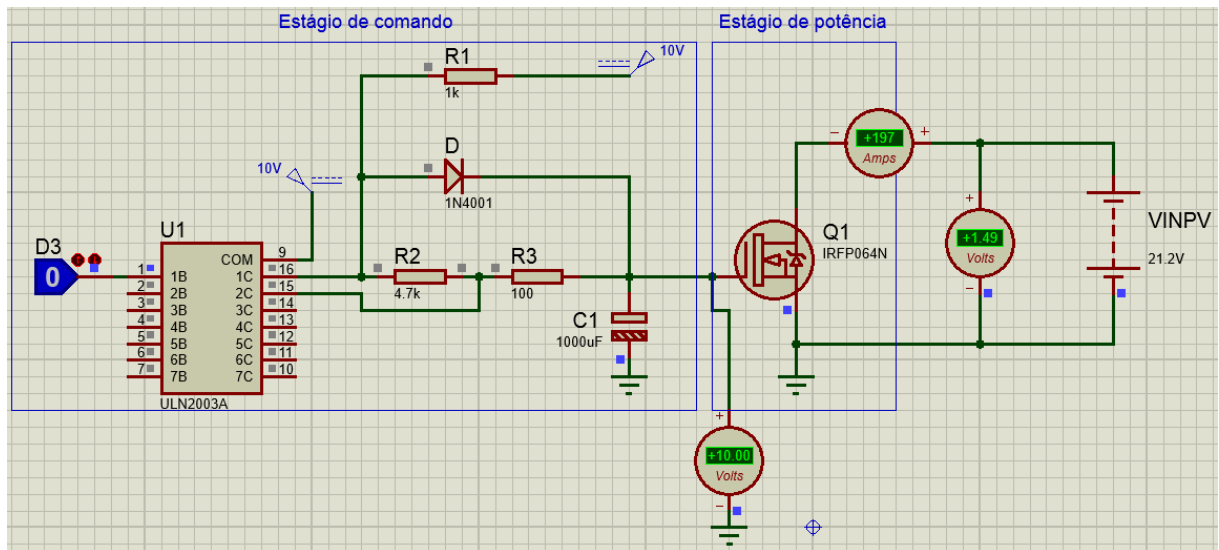
Figura 34 – Varredura dos pontos da curva IV com o descarregamento do capacitor



Fonte: Autoria Própria

5.2 Obtenção dos Dados nos Módulos Fotovoltaicos

As últimas etapas do projeto foram a realização da coleta dos dados dos módulos fotovoltaicos em funcionamento e avaliação do coletor de dados que foi desenvolvido. A coleta de dados foi realizada no Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa, especificamente no Laboratório de Sistemas Digitais. Para o módulo de 10 W, o monitoramento foi realizado no dia 05/07/2023, a partir das 13 horas e 17 minutos, com uma temperatura

Figura 35 – Reinicialização do processo de varredura dos pontos da curva IV

Fonte: Autoria Própria

média do ambiente em $26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Conforme mostra a Figura 36, a irradiação fornecida ao módulo fotovoltaico é gerada por uma lâmpada incandescente, cuja potência é de 500 W . Esta abordagem de ter usado a irradiação com lâmpada incandescente permite comparar os dados obtidos com o coletor de dados desenvolvido com outros dispositivos atuando sob as mesmas condições.

A unidade de processamento composta pelo ESP8266 realiza o controle das leituras dos valores de V_{OC} e I_{SC} por meio do módulo ADC e envia os dados ao banco de dados por meio da conexão Wi-Fi. Um recorte dos dados armazenados no banco de dados é mostrado na Figura 37. Com os dados obtidos, foram gerados, na página *web*, os gráficos da curva IV, V_{OC} e I_{SC} para o módulo de 10 W conforme mostra as Figuras 38, 39 e 40. A quantidade de pontos nos gráficos está relacionada com a configuração que foi adotada para o circuito RC do estágio de comando na carga eletrônica. A constante de tempo para o decaimento da tensão sobre o capacitor foi calculada em aproximadamente 5 s .

Para verificar os valores gerados da tensão de circuito aberto, foi utilizado um voltímetro digital. Este método permitiu visualizar os valores que estavam sendo registrados no banco de dados, contudo não foi possível realizar uma comparação dos valores obtidos pelo sistema de monitoramento devido o voltímetro digital não ter um dispositivo de armazenamento de medições. Uma das formas de ter calculado o erro neste trabalho seria por meio destas comparações obtidas pelos instrumentos de medição.

Figura 36 – Aquisição de dados no módulo fotovoltaico de 10 W

Fonte: Autoria Própria

Figura 37 – Dados parciais do módulo de 10 W no banco de dados

```
SELECT id 'Número da medição realizada', tensao as 'Tensão elétrica (V)', corrente as 'Corrente elétrica (A)', DATE_FORMAT(data_hora, '%d/%m/%Y') as 'Data' FROM (SELECT * FROM tb_medidas_coletor ORDER BY id DESC LIMIT 13) tmp ORDER BY tmp.id ASC;
```

Profiling [[Edit inline](#)] [[Edit](#)] [[Explain SQL](#)] [[Create PHP code](#)] [[Refresh](#)]

Show all | Number of rows: 25 | Filter rows:

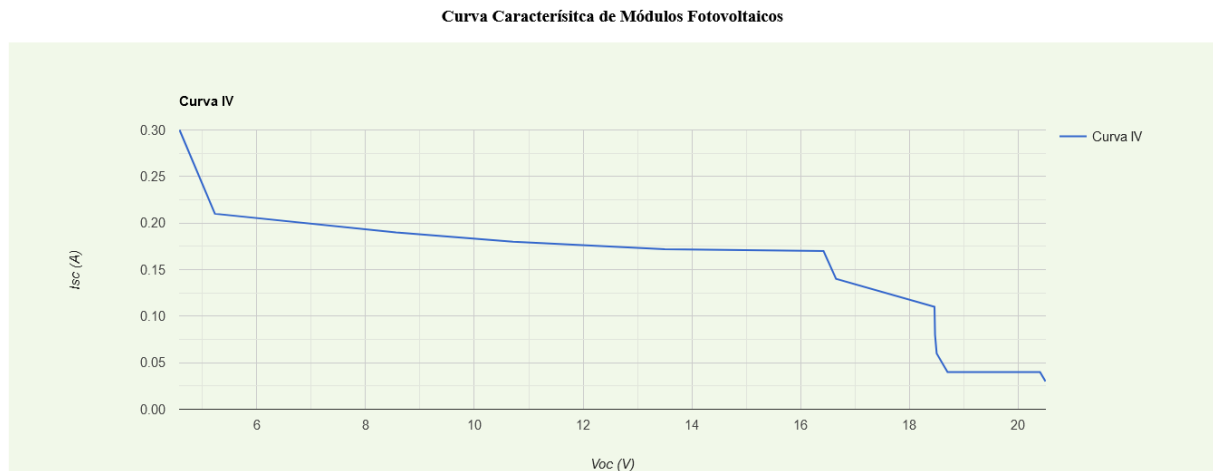
Extra options

Número da medição realizada	Tensão elétrica (V)	Corrente elétrica (A)	Data
832	4.58	0.3	05/07/2023
833	5.23	0.21	05/07/2023
834	8.56	0.19	05/07/2023
835	10.71	0.18	05/07/2023
836	13.5	0.172	05/07/2023
837	16.42	0.17	05/07/2023
838	16.65	0.14	05/07/2023
839	18.46	0.11	05/07/2023
840	18.47	0.08	05/07/2023
841	18.5	0.06	05/07/2023
842	18.7	0.04	05/07/2023
843	20.4	0.04	05/07/2023
844	20.5	0.03	05/07/2023

Fonte: Autoria Própria

Figura 38 – Curva IV do módulo fotovoltaico de 10 W

Conectado ao Banco de Dados.

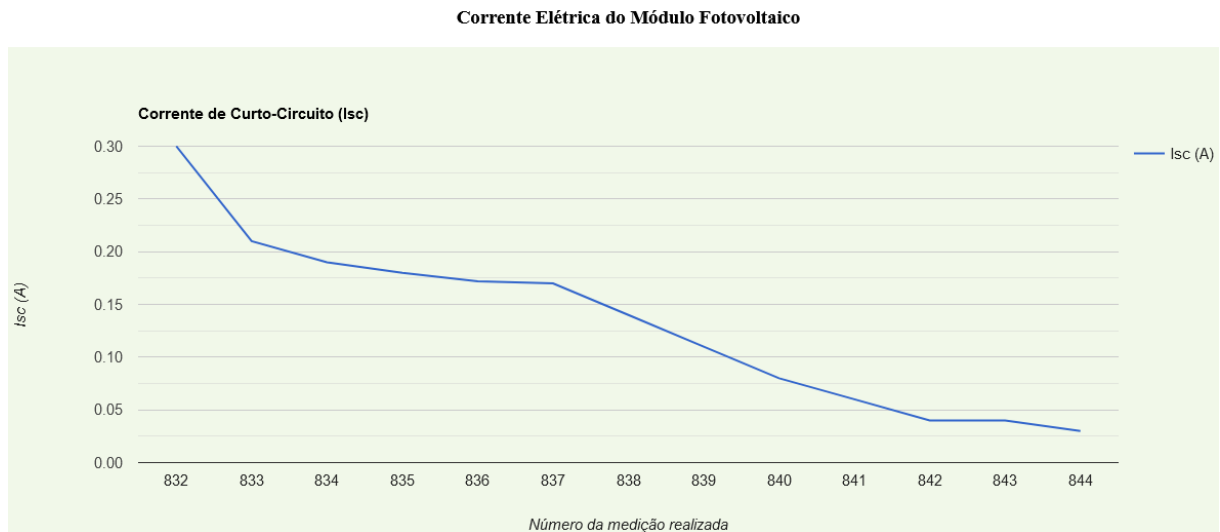


Fonte: Autoria Própria

Figura 39 – Gráfico da tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico de 10 W

Fonte: Autoria Própria

Embora a duração das medições foi menor que 2 minutos, foi observado sobreaquecimento no coletor de dados. Isso comprometeu a aquisição dos dados no módulo de 95 W. A escolha de uma caixa de uso geral maior poderia ser utilizada para montagem das placas de circuitos impressos, uma vez que os fios das conexões limitaram o espaço interno e conseqüentemente a ventilação foi comprometida. Outro ponto importante que se destaca é que deveria ser usado um dissipador de calor no MOSFET da carga eletrônica. Com o módulo de 95 W uma quantidade excessiva de calor seria gerada, e com isso as placas seriam danificadas. Os testes na matriz de contatos mostraram que o resistor *shunt*, por ser fabricado em porcelana, tinha uma variação considerável de sua resistência. Então, para operação dos circuitos elétricos em grandes intervalos de tempo, os dados coletados apresentariam erros. Este resistor *shunt* poderia ser substituído por um modelo

Figura 40 – Gráfico da corrente de curto-circuito do módulo de 10 W

que estivesse devidamente calibrado e fosse fabricado com propósitos de ser usado em situações que exige-se precisão e confiança nas medições.

Os pontos da curva característica na Figura 38 não estão espaçados de forma proporcional porque a instabilidade da rede Wi-Fi fez com que o ESP8266 ficasse desconectado, e com isso os valores armazenados na memória fossem perdidos na iteração atual do algoritmo. Uma solução para este problema seria armazenar primeiramente os dados obtidos em um vetor, sem estabelecer conexão com a rede Wi-Fi, e enviá-los ao banco de dados quando uma função solicitar conexão à rede. Como o circuito da carga eletrônica é do tipo RC, uma variação maior da resistência e capacitância contribuem para que o tempo de resposta do circuito aumente, e desta forma pode-se aumentar também o número de pontos na curva característica para tornar as medições mais confiáveis.

A adesão à outra unidade microcontrolada responsável pelo processamento dos dados obtidos deve ser avaliada para verificar se não afetará o desenvolvimento e programação do sistema embarcado, bem como implicará em aumento dos custos. Pelo fato do ESP8266 ter embutido uma antena Wi-Fi, isso fez com que a programação se tornasse simples, sem necessidade de inserir novos componentes eletrônicos no coletor de dados. Uma função que poderia ser implementada no sistema de monitoramento é a emissão de alerta na página *web* a partir do perfil da curva característica gerada, como a identificação de sombreamentos. Contudo, esta implementação dependeria de variáveis que não fazem parte do escopo deste trabalho, como índice de irradiação, temperatura do módulo fotovoltaico e outras condições ambientais.

CONCLUSÃO

A avaliação dos módulos ou sistemas fotovoltaicos é imprescindível para que o projetista compreenda quais variáveis ambientais ou até mesmo a constituição física desses equipamentos influenciem na eficiência, e com isso sejam propostas melhorias. A medição da tensão e corrente elétrica, tal como a obtenção da curva característica são dados que são usados para analisar a eficiência da geração solar. A fim de monitorar as grandezas elétricas foi desenvolvido de forma sistematizada os circuitos elétricos do dispositivo coletor de dados da geração fotovoltaica, monitoramento remoto e obtenção da curva característica dos módulos fotovoltaicos.

Por meio do capítulo 2 foram identificados os conceitos básicos e equipamentos que convertem a energia solar em eletricidade por meio dos módulos fotovoltaicos. Além disso, este capítulo apresenta que o estudo dos parâmetros elétricos e modos de obtenção da curva IV dos módulos são fundamentais para a avaliação da eficiência do sistema de geração solar. A revisão bibliográfica apresentada no capítulo 3 contempla alguns trabalhos que foram desenvolvidos e que serviram de base de conhecimento para dimensionamento e desenvolvimento do dispositivo proposto conforme apresentado no capítulo 4.

Os objetivos específicos da simulação foram alcançados, uma vez que foi constatado o funcionamento e dimensionamento corretos dos circuitos elétricos dos medidores. A obtenção dos dados no módulo fotovoltaico de 10 W e geração dos gráficos constataram a funcionalidade do equipamento e viabilidade de aperfeiçoá-lo a partir dos pontos que foram destacados, no capítulo 5, quando foi submetido à operação. Pelo fato de ser um dispositivo desenvolvido com recursos de fácil acesso, a construção pode ser implementada com o objetivo de usá-lo em aulas práticas de laboratório que precise avaliar a curva característica, tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito dos módulos fotovoltaicos.

Referências Bibliográficas

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16274: Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede - Requisitos Mínimos para Documentação, Ensaios de Comissionamento, Inspeção e Avaliação de Desempenho.** Rio de Janeiro - RJ, 2014.

ALEXANDER, A. C.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de circuitos elétricos.** 5. ed. Porto Alegre - RS: AMGH, 2013.

ANALOG DEVICES. **AD620: Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier.** Norwood - United States: Analog Devices, 2011.

ANJOS, D. A. P. **Obtenção de Curva Característica de Placa Solar Fazendo Uso de Arduino.** 63 f. Monografia (Graduação em Ciências Exatas e Tecnológicas) — Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UFRB, Cruz das Almas - BA, 2019.

ARAÚJO, A. L. L.; LOPES, A. V.; MOREIRA, A. B. **Topologias em Traçador de Curva I-V para Módulos fotovoltaicos.** Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza - CE, n. 8, Junho 2020.

BALFOUR, J.; SHAW, M.; NASH, N. B. **Introdução ao Projeto de Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2019.

BATES, M. **PIC Microcontrollers: An Introduction to Microelectronics.** 3. ed. Waltham: Elsevier, 2011.

BELGHITH, O. B.; SBITA, L. **Remote GSM Module Monitoring and Photovoltaic System Control.** First International Conference on Green Energy, Sfax - Tunisia, p. 188–192, 2014.

BIAN, L. et al. **A Multifunctional Data Acquisition System for Photovoltaic Plants.** International Conference on Systems and Informatics, Beijing - China, 2012.

CÁCERES, M. et al. **Low-Cost I–V Tracer for PV Modules under Real Operating Conditions.** Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), n. 13, August 2020.

CASADO, P. et al. **Raspberry Pi Based Photovoltaic I-V Curve Tracer.** Elsevier, Alicante - Spain, v. 11, January 2022.

CHESINI, D.; GABE, I. J. **Sistema Wireless de Aquisição de Dados com Armazenamento em Nuvem Aplicado ao Monitoramento de Plantas Fotovoltaicas.** IFRS, Farroupilha - RS, 2017.

- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2021: Ano Base 2020**. Rio de Janeiro - RJ: EPE, 2021.
- FARIAS, L. E. S.; REBOUÇAS, G. O. G. **Protótipo de Traçador de Curva IxV pelo Método de Resistor Variável, Usando Relés, com Teste em Módulo FV Avariado**. UFERSA, Angicos - RN, n. 1, Fevereiro 2020.
- FUENTES, M. et al. *Design of an Accurate, Low-cost Autonomous Data Logger for PV System Monitoring Using Arduino that Complies with IEC Standards*. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 130, p. 529–543, November 2014.
- GOLDEMBERG, J.; CHU, S. **Um Futuro com Energia Sustentável: Iluminando o Caminho**. Rio de Janeiro - RJ: Academia Brasileira de Ciências, 2010.
- GONZÁLEZ, I.; PORTALO, J. M.; CALDERÓN, A. J. *Configurable IoT Open-Source Hardware and Software I-V Curve Tracer for Photovoltaic Generators*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Badajoz - Spain, n. 21, March 2021.
- LUNA, M. L. M.; CARVALHO, P. C. M. **Desenvolvimento e Validação de Traçador de Curvas IxV para Módulos Fotovoltaicos**. Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte - MG, n. 6, Abril 2016. ISSN 978-85-86923-43-2.
- MELO, L. S. et al. **Análise Comparativa de Modelos Fotovoltaicos: Uma Abordagem Didática**. Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado - RS, n. 7, Abril 2018. ISSN 978-85-62179-02-0.
- MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021: Ano Base 2020**. Brasília - DF: EPE, 2021.
- MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de Automação Industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 2010.
- MOREIRA, J. R. S. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. 2. ed. Rio de Janeiro - RJ: Grupo GEN, 2021.
- MÜLLER, M. L. **Sistema Supervisório e Aquisição de Dados de uma Usina de Geração Fotovoltaica**. 93 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) — Centro Tecnológico, UFSC, Florianópolis - SC, 2017.
- OLIVA, A. C.; HERRANZ, G. S. **Instalaciones Solares Fotovoltaicas**. Madrid - Spain: Editorial Editex, 2010.
- ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Boletim Mensal de Geração Solar Fotovoltaica Agosto/2021**. Rio de Janeiro - RJ: ONS, 2021.
- PAIVA, E. C. **Energia Solar, no Topo da Atmosfera, ao Nível do Solo e Simulações**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, v. 7, n. 12, p. 51–68, Dezembro 2018. ISSN ISSN:2448-0959.
- PEIXOTO, J. A. **ESP8266 NodeMCU: Do Pisca LED à Internet das Coisas**. 1. ed. Porto Alegre - RS: UERGS, 2021.

- PEREIRA, T. A. et al. **Caracterizador Elétrico de módulos Fotovoltaicos Utilizando o Conversor CC-CC \dot{C} UK**. Revista Eletrônica de Potência, Campo Grande - MS, v. 22, n. 2, p. 139–147, Abril-Junho 2017.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro - RJ: CEPEL - CRESESB, 2014.
- PIOMBINI, E. S.; MELO, W. W. M. **Aplicativo Android para Monitoramento Remoto de Módulos Fotovoltaicos**. Congresso Brasileiro de Energia Solar, n. 7, Abril 2018. ISSN 978-85-62179-02-0.
- PRAÇA, F. S. G. **Metodologia da Pesquisa Científica: Organização Estrutural e os Desafios para Redigir o Trabalho de Conclusão**. Revista Eletrônica Diálogos Acadêmicos, n. 1, p. 72–87, Janeiro-Julho 2015. ISSN 0486-6266.
- SADARJOSHI, S. R.; USHA, P. *Design and Fabrication of Regulated DC Electronic Load for Testing Power Supplies and Batteries*. IEEE Xplore, November 2016.
- SARIKH, S. et al. *Design of an I-V Characteristic Tracer For Photovoltaic Systems*. Conference: International Renewable and Sustainable Energy Conference, Tangier - Morocco, December 2017.
- SAYYAD, J.; NASIKKAR, P. *Design and Development of Low Cost, Portable, On-Field I-V Curve Tracer Based on Capacitor Loading for High Power Rated Solar Photovoltaic Modules*. IEEE Access, v. 9, May 2021.
- SILVA, I. F. et al. *Plotting Characteristic Curves of Photovoltaic Modules: A Simple and Portable Approach*. IEEE Industry Applications Magazine, v. 27, p. 63–72, June 2021.
- STEIN, A. B. et al. **Smart Solar Energy: Sistema de Monitoramento de Produção Solar Fotovoltaica**. Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza - CE, n. 8, Junho 2020. ISSN 978-65-993338-0-4.
- STEVAN, S. L. J.; FARINELLI, F. A. **Domótica: Automação Residencial e Casas Inteligentes com Arduino e ESP8266**. 1. ed. São Paulo - SP: Editora Saraiva, 2019.
- TEXAS INSTRUMENTS. *LMx24, LMx24x, LMx24xx, LM2902, LM2902x, LM2902xx, LM2902xxx Quadruple Operational Amplifiers*. Texas - United States: Texas Instruments, 2015.
- TITTON, M. G.; BÜHLER, A. J. **Desenvolvimento de sistema de aquisição de dados para instalações fotovoltaicas baseado na plataforma Arduino**. Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente, Huancayo - Peru, p. 188–192, 2016.
- VIAN, Â. et al. **Energia Solar: Fundamentos, Tecnologia e Aplicações**. São Paulo - SP: Blucher, 2021.
- WILLOUGHBY, A. A.; OMOTOSHO, T. V.; AIZEBEOKHAI, A. P. *A Simple Resistive Load I-V Curve Tracer for Monitoring Photovoltaic Module Characteristics*. International Renewable Energy Congress, Hammamet - Tunisia, n. 5, p. 63–72, March 2014.