



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS FONSECA BASTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA
MONITORAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

MOSSORÓ

2019

MATHEUS FONSECA BASTOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA
MONITORAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Controle e Automação

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Roberto Bastos
Guerra Vale - UFERSA

Co-orientadora: Prof. Dr. Fabiana Karla de
Oliveira Martins Varella Guerra - UFERSA

MOSSORÓ

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

BB327 Bastos, Matheus Fonseca.
d DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA
MONITORAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS / Matheus
Fonseca Bastos. - 2019.
103 f. : il.

Orientadora: Marcelo Roberto Bastos Guerra
Vale.

Coorientadora: Fabiana Karla de Oliveira
Martins Varella Guerra.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica, 2019.

1. Monitoramento. 2. Eficiência. 3. Irradiância
Solar. 4. Sistema Fotovoltaico. I. Vale, Marcelo
Roberto Bastos Guerra, orient. II. Guerra,
Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella, co-
orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MATHEUS FONSECA BASTOS

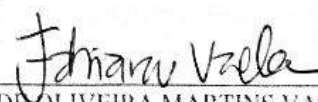
**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA
MONITORAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Dissertação apresentada ao Mestrado do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica

Defendido em: 17/12/2019

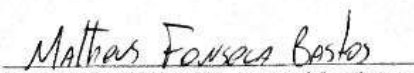
BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. MARCELO ROBERTO BASTOS GUERRA VALE (UFERSA)


Profa. Dra. FABIANA KARLA DE OLIVEIRA MARTINS VARELLA GUERRA (UFERSA)


Profa. Dra. DANIELLE SIMONE S. CASILLO (UFERSA)


Prof. Dr. RODRIGO SIQUEIRA MARTINS (IFRN - videoconferência)


MATHEUS FONSECA BASTOS (discente)

BR 110 – Km 47 – Bairro Pres. Costa e Silva – Caixa Postal 137
CEP 59625-900 – Mossoró – RN – (084) 3315-1724 – Fax (084) 3315-1778
Home page: <http://www.ufersa.edu.br>

RESUMO

A busca incessante pelo desenvolvimento de uma matriz energética sustentável representa hoje um dos maiores desafios a serem enfrentados pela humanidade e, dentre as diversas ações que podem ser realizadas, o uso de fontes alternativas de energia renováveis é sem dúvida uma das mais importantes. Dentre as fontes alternativas de energia renováveis a energia solar fotovoltaica é a que vem recebendo mais atenção dentro da comunidade científica atual, por ser uma fonte limpa, renovável e com baixo índice de manutenção. No entanto, apesar de apresentar diversos benefícios, por ser uma tecnologia relativamente nova quando comparada com fontes tradicionais, necessita de certos cuidados, bem como de um monitoramento frequente de seu funcionamento. Nesse contexto, o trabalho tem como proposta, projetar e desenvolver um dispositivo, através de *hardware* livre, para o monitoramento e aquisição de dados de um painel solar fotovoltaico. Pretende-se ainda monitorar a incidência de irradiância solar sobre esse painel, a fim de analisar tanto a geração quanto a sua eficiência, utilizando conceitos de lógica fuzzy. Para isso, será utilizada uma placa microcontroladora *wemos atmega2560 wifi*, que será responsável por toda base de processamento, aquisição e transmissão de dados. Além disso, serão utilizados sensores para leitura de tensões e correntes (INA 219), temperatura/umidade (BME 280) e infravermelho (MLX 90614) para temperatura na superfície do painel. Os dados serão armazenados tanto no servidor da plataforma *Blynk* quanto em um cartão de memória (*datalogger*). Por fim, foram realizados testes com o intuito de validar a qualidade e confiabilidade do dispositivo em diversos cenários, permitindo, assim, concluir que o dispositivo apresentou uma boa estabilidade e confiabilidade na aquisição e transmissão dos dados.

Palavras-Chave: Monitoramento. Eficiência. Irradiância Solar. Sistema Fotovoltaico.

ABSTRACT

The continuous search for the development of a sustainable energy matrix represents today one of the biggest challenges facing humanity and, among the many actions that can be taken, the use of alternative renewable energy sources is undoubtedly one of the most important. Among the alternative sources of renewable energy, photovoltaic solar energy is receiving the most attention within the current scientific community, as it is a clean, renewable and low maintenance source. However, although it has several benefits, being a relatively new technology compared to traditional sources, it needs some care, as well as frequent monitoring of its operation. In this context, the work aims to design and develop a device, through free hardware, for monitoring and data acquisition of a photovoltaic solar panel. It is also intended to monitor the incidence of solar irradiance on this panel, in order to analyze both the generation and its efficiency, using fuzzy logic concepts. For this, a wemos atmega2560 wifi microcontroller board will be used, which will be responsible for the entire data processing, acquisition and transmission base. In addition, sensors will be used for voltage and current (INA 219), temperature / humidity (BME 280) and infrared (MLX 90614) reading for panel surface temperature. The data will be stored on both the Blynk platform server and a data card (datalogger). Finally, tests were performed in order to validate the quality and reliability of the device in various scenarios, thus concluding that the device presented good stability and reliability in data acquisition and transmission.

Keywords: Monitoring. Efficiency. Solar irradiance. Photovoltaic system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Geração Distribuída	18
Figura 2: Capacidade Instalada da Geração Distribuída entre 2012 e 2019.....	20
Figura 3: Quantitativo de unidade consumidoras com geração distribuída no Brasil até o final de 2018	23
Figura 4: Potência instalada até o final de 2018.....	23
Figura 5: Efeito do Sombreamento.....	25
Figura 6: Proteção contra corrente reversa (diodo by-pass).....	26
Figura 7: Influência da variação da irradiância solar na curva I-V de uma célula fotovoltaica	27
Figura 8: Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V	28
Figura 9:Diferença entre a lógica clássica e a lógica fuzzy.....	32
Figura 12: Controlador Fuzzy	35
Figura 13: Tipos de defuzzificação.....	37
Figura 14: Saída de um Controlador Fuzzy.....	38
Figura 15: Cálculo do Centróide	39
Figura 16: Sobreposição de áreas	39
Figura 17: Previsão de dispositivos conectados à Internet até 2022	42
Figura 18: Estrutura básica da IoT	42
Figura 19: Arquitetura básica de um dispositivo inteligente	43
Figura 20: Estrutura da plataforma Blynk	46
Figura 21: Local da Pesquisa.....	50
Figura 22: Procedimentos da pesquisa	51
Figura 23: Esboço de um piranômetro	52
Figura 24: Teste para obtenção da Corrente de curto-circuito (I_{cc}).....	53
Figura 25: Representação de um dia de irradiância solar acima do normal	53
Figura 26: Testes com a célula fotovoltaica	54
Figura 27: Circuito condicionador de sinal para linearização do sinal.....	55
Figura 28: Montagem do circuito condicionador de sinal	56
Figura 29: Placa wemos Atmega2560 wifi	57
Figura 30: Método de medição High-side	59
Figura 31: Ligação do sensor INA219	60
Figura 32: Ligação do sensor BME 280	61
Figura 33: Sensor de temperatura infravermelho mlx90614.....	61

Figura 34: Instalação do sensor de temperatura infravermelho.....	62
Figura 35: Montagem do módulo RTC DS3231	63
Figura 36: Montagem do módulo microSD.....	64
Figura 37: Ambiente de programação - IDE	65
Figura 38: Declaração das bibliotecas	67
Figura 39: Configuração para comunicação entre o microcontrolador e o	68
Figura 40: Calibração do sensor de irradiância solar	69
Figura 41: Configuração das variáveis linguísticas.....	70
Figura 42: Variável "Irradiância Solar"	70
Figura 43: Variável "Horário"	71
Figura 44: Variável "Incidência Solar"	71
Figura 45: Dimensões do painel fotovoltaico.....	72
Figura 46: Programação para obtenção da eficiência e da potência estimada.....	73
Figura 47: Eficiência do painel fornecida pelo supervisorio	73
Figura 48: Características elétricas do painel fotovoltaico.....	74
Figura 49: Comparação entre a potência real e a potência estimada.....	75
Figura 50: Armazenamento dos dados	75
Figura 51: Bateria de 5000mAh para alimentação do sistema supervisorio	76
Figura 52: Alimentação do sistema por meio de uma bateria de lithium de 5000mAh	76
Figura 53: Dispositivo para monitoramento de um painel fotovoltaico.....	77
Figura 54: Local onde foi realizado os testes	79
Figura 55: Comunicação com o servidor Blynk.....	80
Figura 56: Local de instalação do sensor de irradiância solar	81
Figura 57: Comparativo entre a irradiância solar do sensor desenvolvido e o piranômetro	81
Figura 58: Estação meteorológica da usina solar da UFERSA	82
Figura 59: Eficiência obtida pelo dispositivo	82
Figura 60: Simulação da lógica fuzzy	84
Figura 61: Lógica fuzzy implementada no supervisorio Blynk	84
Figura 62: Incidência solar sobre a superfície do painel	85
Figura 63: Temperatura na superfície do painel.....	86
Figura 64: Comparação entre a potência estimada e a potência real.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do Painei Fotovoltaico	50
Tabela 2: Modos de operação da placa wemos Atmega 2560 wifi	58
Tabela 3: Comparação entre microcontroladores	65
Tabela 4: Custo para elaboração do projeto	78

NOMENCLATURA

Letras Latinas

V – Tensão

R – Resistência

I_{sc} – Corrente de curto-circuito

V_{oc} – Tensão de circuito aberto

P_m – Potência máxima

I_{mp} – Corrente de máxima potência

D_{dp} – Diferença de potencial

V_{mp} – Tensão de máxima potência

A – Área

I_c - Irradiância solar

Letras Gregas

η – Eficiência

α – Inclinação dos painéis

Siglas

Ac – Corrente Alternada (*Alternate Current*)

Dc – Corrente Continua (*Direct Current*)

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CI – Circuito Integrado

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

USB – Universal Serial Bus

STC – Condições de teste padrão

PVUSA – Condições de Teste de Energia Fotovoltaica para Aplicações em Escala de Utilidades

NOTC – Condição nominal da temperatura de operação

Abreviações

FV – Fotovoltaico

mV – Millivolts

kW – Quilowatt

GW – Gigawatts

MW – Megawatts

FV – Fotovoltaico

Ep_{v,d} – Energia diária fornecida pelo painel

Er_d – Irradiância diária na superfície do arranjo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO GERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3 JUSTIFICATIVA	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	18
2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	21
2.2.1 <i>Cenário Atual da Energia Solar Fotovoltaica</i>	22
2.3 EFEITO DO SOMBREAMENTO	24
2.5 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DA IRRADIÂNCIA SOLAR.....	26
2.6 EFICIÊNCIA DO PAINEL SOLAR	28
2.7 LÓGICA FUZZY	31
2.4.1 <i>Conjuntos Fuzzy</i>	32
2.4.2 <i>Variáveis Linguística</i>	33
2.4.3 <i>Sistema Fuzzy</i>	35
2.4.4 <i>Centro-da-Área (C-o-A)</i>	38
2.4.5 <i>Centro-do-Máximo (C-o-M)</i>	40
2.4.6 <i>Média-do-Máximo (M-o-M)</i>	40
2.5 INTERNET OF THINGS (IoT).....	41
2.5.1 <i>Arquiteturas básica dos dispositivos</i>	43
2.5.1.1 <i>Processamento</i>	44
2.5.1.2 <i>Comunicação</i>	44
2.5.1.3 <i>Fonte de Energia</i>	44
2.5.1.4 <i>Sensores</i>	44
2.7 SISTEMA DE MONITORAMENTO	45
2.7.1 <i>Plataforma Blynk</i>	45
2.9 TRABALHOS RELACIONADOS	47
3 METODOLOGIA.....	49
3.1 METODOLOGIA DA PESQUISA	49
3.2 LOCAL DA PESQUISA	49
3.3 PROCEDIMENTOS DA PESQUISA	51
3.3.1 <i>Desenvolvimento e Calibração de um Sensor de Irradiância Solar</i>	52
3.3.2 <i>Configuração Placa wemos atmega2560 wifi</i>	57
3.3.3 <i>Módulo de aquisição de dados</i>	58
3.3.3.1 <i>Sensor INA 219</i>	58
3.3.3.2 <i>Sensor BME280</i>	60
3.3.3.3 <i>Sensor MLX 90614</i>	61
3.3.3.4 <i>Datalogger</i>	62
3.3.4 <i>Programação e Lógica Fuzzy</i>	64
3.3.4.1 <i>Lógica Fuzzy e biblioteca eFLL</i>	65
3.3.4.2 <i>Estrutura da programação</i>	67

3.3.5 Alimentação do dispositivo	75
3.4 MONTAGEM E ENCAPSULAMENTO DO <i>HARDWARE</i>	77
3.5 CUSTOS DOS EQUIPAMENTOS	77
4 RESULTADOS	79
4.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS	87
5 CONCLUSÃO.....	89
5.1 TRABALHOS FUTUROS	90
ANEXO 1 – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO TL062.....	95
ANEXO 2 – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO SENSOR INA 219.....	96
ANEXO 3 – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO SENSOR BME 280.....	97
ANEXO 3.1 ESPECIFICAÇÕES DO SENSOR DE TEMPERATURA	97
ANEXO 3.2 ESPECIFICAÇÕES DO SENSOR DE UMIDADE	98
ANEXO 4 – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO SENSOR MLX90614.....	99
ANEXO 5 – DATASHEET DO PAINEL FOTOVOLTAICO.....	101
APÊNDICE 1 – CONDICIONADOR DE SINAL PARA UM SENSOR DE IRRADIÂNCIA SOLAR.....	102
APÊNDICE 2 – PROGRAMAÇÃO	103

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a procura por fontes de energia sustentáveis cresceu significativamente, no Brasil e no mundo, devido a fatores como esgotamento de combustíveis fósseis e contaminação do meio-ambiente. Atualmente, a energia solar fotovoltaica (FV) vem ganhando destaque por ser uma fonte de geração limpa. Além disso, oferece o benefício de fácil instalação, baixo investimento e uma geração sem ruídos, dentre diversas outras vantagens que esta tecnologia oferece. Ainda assim, a eficiência dos painéis fotovoltaicos vem aumentando dia após dia com o avanço da tecnologia (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Atualmente, os sistemas fotovoltaicos são instalados em uma ampla faixa, desde as mais simples instalações na parte superior do telhado de uma residência até grandes usinas geradoras de energia elétrica. Nesse contexto, para se obter um melhor desempenho e facilidade de manutenção, os sistemas de energia fotovoltaica necessitam ser monitorados continuamente, especialmente quando as instalações estão em áreas rurais ou em locais de difícil acesso.

No entanto, os sistemas de aquisição de dados e monitoramento em tempo real são, geralmente, encontrados em grandes usinas geradoras de energia elétrica, uma vez que tais equipamentos são complexos e possuem um custo relativamente alto, tornando esses sistemas impraticáveis em escala de micro e mini geração de energia GAD (2015). Portanto, de modo a superar tal limitação e contribuir para a propagação dos sistemas de micro e mini geração de energia solar fotovoltaica, este trabalho irá projetar e desenvolver um dispositivo para aquisição e monitoramento dos dados de um painel fotovoltaico em tempo real.

Um exemplo de sistema de monitoramento em tempo real é exposto pela Energy Monitoring (2019), na qual apresentam informações úteis sobre um sistema fotovoltaico no Norte da Califórnia através de uma página web. Todos os dados são coletados e armazenados em um servidor com backup. Tais dados são enviados periodicamente ao servidor, o qual pode ser acessado por qualquer pessoa através de uma senha e um *login*.

Segundo BADAVE et al (2016), os sistemas de aquisição e monitoramento de dados podem ser divididos em três partes: (I) unidade de detecção; (II) unidade de processamento e (III) unidade de exibição. A unidade de detecção consiste, basicamente, de vários sensores e circuitos de condicionadores de sinais. Logo, essa unidade é localizada o mais próximo do sistema fotovoltaico. A unidade de processamento consiste em controlar todos os dados fornecidos pela unidade de detecção por meio de um controlador, o qual é responsável por processar e transmitir as informações obtidas pela unidade de detecção à unidade de exibição

por meio de uma rede com ou sem fio. A unidade de exibição, por sua vez, irá receber todas as informações processadas e exibir em um supervisor.

Portanto, com o aumento da geração distribuída nos últimos anos, em especial a energia solar fotovoltaica, apontam para a necessidade de um sistema para monitoramento e aquisição dos dados de baixo custo para micro e mini gerações. O uso de dispositivos para monitoramento de sistemas fotovoltaicos em tempo real aumenta a confiabilidade e a vida útil desse sistema e, por conseguinte, sua eficiência.

1.1 Objetivo Geral

A fim de atingir a proposta da pesquisa, o presente trabalho tem como objetivo geral projetar e desenvolver um dispositivo para monitoramento e aquisição de dados de eficiência, potência estimada e potência real, assim como tensão e corrente de um painel solar fotovoltaico. Além disso, será monitorado a incidência de irradiância solar sobre as células fotovoltaicas e a temperatura de operação, a fim de analisar tanto a geração quanto a eficiência desse painel.

1.2 Objetivos Específicos

Com o intuito de alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Projetar e desenvolver um *hardware* capaz de realizar leitura das grandezas elétricas de um sistema fotovoltaico;
- Projetar um dispositivo portátil de fácil instalação em painéis fotovoltaicos;
- Utilizar o conceito da *IoT* para a transmissão dos dados coletados através da placa wemos atmega2560 *wifi*;
- Realizar coleta de dados da irradiância solar incidente sobre o painel solar fotovoltaico;
- Desenvolver uma lógica *fuzzy* para monitoramento, por meio de uma placa microcontroladora, da incidência de irradiância solar sobre a superfície de um painel fotovoltaico;
- Avaliar a eficiência fornecida pela fabricante com a eficiência de instalação.

1.3 Justificativa

Nos últimos anos a energia solar fotovoltaica tem sido vista como uma das fontes de energia renováveis mais promissora, visto que esse tipo de tecnologia depende, sobretudo, da radiação solar que é abundante em diversas regiões do país, principalmente nas regiões Norte e Nordeste.

Embora as técnicas para a geração de energia fotovoltaica estejam a cada ano mais avançadas, os sistemas fotovoltaicos, em especial os conectados à rede elétrica, estão continuamente expostos a fatores que afetam significativamente seu desempenho. Apesar de ser um fator ainda pouco estudado, o impacto em painéis fotovoltaicos devido ao acúmulo de sujidades em sua superfície pode vir a ser bastante significativo em áreas com longos períodos de estiagem, ou em áreas poluídas com alta concentração de partículas, como é o caso da cidade de Mossoró, situada no semiárido potiguar.

Além disso, o aumento da temperatura da célula fotovoltaica afeta de forma relevante a sua geração. De fato, quando uma parte da radiação solar que atinge as células fotovoltaicas não é convertida em energia elétrica, ela é transformada em energia térmica na célula fotovoltaica. Isso faz com que a temperatura na célula aumente e, portanto, a eficiência do sistema fotovoltaico diminua (YAHYAOU, 2017).

Além desses fatores, algumas falhas transitórias, especialmente aquelas relacionadas ao sombreamento parcial, afetam negativamente a operação dos painéis fotovoltaicos. Por conseguinte, a irradiância solar constante na superfície dos painéis fotovoltaicos nem sempre é garantida, uma vez que a presença de edifícios, sombras de árvores, nuvens e até mesmo as mudanças sazonais no ângulo do sol são fatores que podem influenciar em seu rendimento, assim como defeitos/falhas e vandalismo.

Portanto, o monitoramento de painéis fotovoltaicos se faz necessário para manter a confiabilidade de um sistema em pleno funcionamento e, minimizar, dessa forma, custos com possíveis manutenções corretivas e antecipar a identificação de possíveis problemas nos painéis. Com isso, anseia-se que, ao final do desenvolvimento do sistema supervisor o sistema possa fornecer de forma otimizada e clara os dados de tensão e corrente elétrica gerados pelo painel solar fotovoltaico, bem como dados do índice de irradiância solar. Além de, informar ao usuário o quanto de energia elétrica está sendo gerada e qual a eficiência do painel solar fotovoltaico. Pretende-se, ainda, que o sistema supervisor auxilie na detecção de possíveis problemas no sistema, bem como disponibilizar dados de eficiência em tempo real, da incidência de irradiância solar, da temperatura de operação e da potência estimada e da potência

real dos painéis e gerar relatórios diários, possibilitando, portanto, a realização de diagnósticos e manutenções com precisão.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O exposto capítulo irá apresentar, de forma, clara e objetiva, conceitos importantes abordados ao longo deste trabalho. Com ênfase no tocante à energia solar fotovoltaica e seus componentes, assim como os princípios da eficiência energética e o panorama atual de geração no mundo e no Brasil. Além de uma breve descrição sobre lógica *fuzzy*. Ademais, serão analisados trabalhos com propostas semelhantes à deste trabalho.

2.1 Geração Distribuída

A geração distribuída é a geração de energia elétrica realizada nas proximidades do consumidor final. Tal geração foi considerada regra na primeira metade do século XX, quando a energia industrial era praticamente toda gerada localmente. No entanto, a partir da década de 40, a geração de energia nas centrais de grande porte se tornou mais acessível, reduzindo, assim, o interesse dos consumidores, bem como o desenvolvimento tecnológico para incentivar esse tipo de geração (PEREIRA, 2011).

Também conhecida como geração descentralizada, caracteriza-se fundamentalmente pelo uso, de modo integrado ou isolado, de energia por meio de fontes de pequeno porte por parte das concessionárias, consumidores e/ou terceiros, fornecendo eletricidade para o sistema elétrico ou unidades consumidoras específicas, como mostra a Figura 1.

Figura 1: Geração Distribuída



Fonte: Autoria Própria

Dessa forma, a Figura 1 ilustra o esquemático de um modelo de geração distribuída, no qual consiste em um consumidor (residência, comércio ou indústria) o qual irá fazer uso de uma fonte renovável (energia solar, eólica, biomassa etc.). Essa fonte de energia renovável é interligada a um quadro de medição bidirecional, o qual tem a função de injetar energia na rede elétrica, caso o consumidor/gerador não consuma toda energia produzida, ou caso não produza o suficiente, consumir energia da rede.

No Brasil, a geração distribuída foi definida de forma oficial a partir do Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004:

Art. 14. [...] considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, [...] conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento:

I - Hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e

II - Termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, conforme regulação da ANEEL, a ser estabelecida até dezembro de 2004.

Parágrafo único. Os empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustível não estarão limitados ao percentual de eficiência energética [...] (Brasil, 2004).

Após a aprovação da Resolução Normativa nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), que estabeleceu diretrizes para a micro e minigeração elétrica, disseminou-se no Brasil a geração distribuída de energia elétrica em baixa tensão. Além de ampliar a oferta de eletricidade no país, tal medida proporciona diversos benefícios. Entre eles, estão o baixo impacto ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas, a diversificação da matriz energética e a movimentação da economia local (ANEEL, 2015).

Posteriormente, com o objetivo de reduzir a burocracia existente para a conexão da micro e minigeração, a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 687/2015, permitindo, dessa forma, o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada, denominando-se, assim, microgeração distribuída a central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (kW) e minigeração distribuída aquela com potência superior a 75 kW e inferior a 5MW (ANEEL, 2015). Com relação ao quantitativo de energia gerada, a resolução nº687 estabelece:

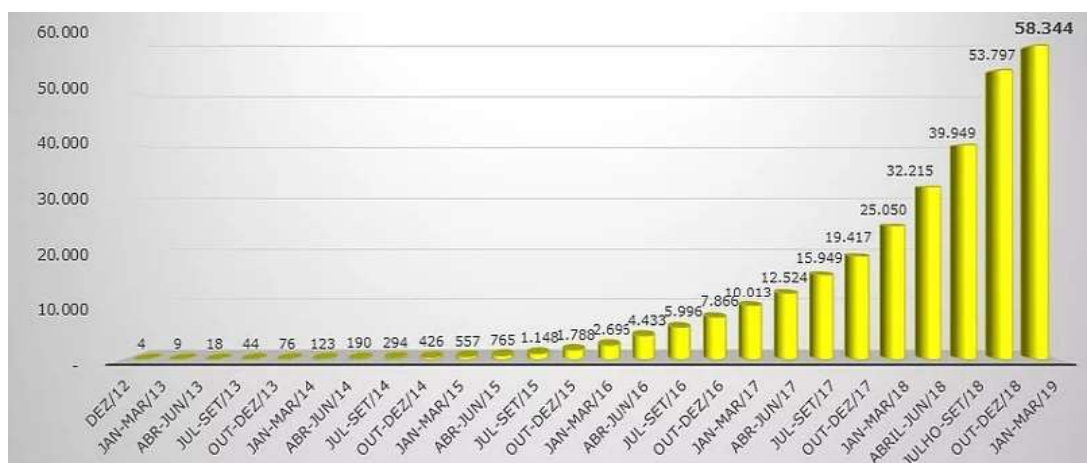
[...] a quantidade de energia gerada em determinado mês for superior à energia consumida naquele período, o consumidor fica com créditos que podem ser utilizados para diminuir a fatura dos meses seguintes. De acordo com as novas regras, o prazo de validade dos créditos passou de 36 para 60 meses, sendo que eles podem também ser usados para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular situadas em outro local, desde que na área de atendimento de uma mesma

distribuidora. Esse tipo de utilização dos créditos foi denominado “autoconsumo remoto” (ANEEL, 2015).

Assim sendo, o consumidor possuirá um sistema de compensação, que, quando a energia injetada na rede elétrica for superior à consumida, receberá um crédito da concessionária, ou seja, o excedente ficará guardado durante 60 meses, no qual esse poderá fazer uso caso seu consumo seja maior que a geração. Além disso, tal crédito poderá ser usado para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular, desde que atendida pela mesma concessionária.

A partir dessas resoluções, observa-se que a implantação da geração distribuída no Brasil está em crescente ascensão, a Figura 2 mostra os dados da capacidade instalada da geração distribuída entre 2012 e 2019. Tal crescimento está relacionado com os programas de incentivos à geração de energia renováveis, como é o caso do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), cuja finalidade é aumentar a participação de fontes alternativas renováveis na produção de energia elétrica (ANEEL, 2016).

Figura 2: Capacidade Instalada da Geração Distribuída entre 2012 e 2019



Fonte: ABGD, 2019

Inserida entre as fontes renováveis, os sistemas de energia solar fotovoltaicos conectados à rede elétrica de baixa tensão são geradores distribuídos no qual tem seus painéis fotovoltaicos como fonte primária de eletricidade. Além disso, a resolução nº687 da ANEEL permite que pessoas físicas e jurídicas tenham geração própria com sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica com potência instalada de até 5MW.

Levando-se em consideração esses aspectos, à medida em que estudos estão sendo aprofundados com o intuito de eliminar as barreiras técnicas, tecnológicas e de mercado, a

geração distribuída pode contribuir para que as energias renováveis tenham uma maior penetração na matriz energética brasileira.

2.2 Energia Solar Fotovoltaica

As tecnologias utilizadas na geração de eletricidade por meio da energia solar, baseiam-se essencialmente na utilização de materiais semicondutores que transformam diretamente a radiação solar em energia elétrica fotovoltaica. O efeito fotovoltaico – nome dado ao processo de conversão de energia solar em energia elétrica – consiste na diferença de potencial elétrico (ddp), produzida por meio da captação da luz solar, nas extremidades de uma estrutura constituída por um material semicondutor.

Segundo CARNEIRO (2010) a descoberta do efeito fotovoltaico ocorreu por volta de 1876, por meio dos cientistas Adams e Day. Não obstante, a devida compreensão deste fenômeno físico só ocorreu anos mais tarde, em 1900, após Max Planck ter estabelecido a teoria quântica. Ainda assim, vale destacar que a descoberta do efeito fotovoltaico é por vezes atribuída a Edmond Becquerel, ao observar a ocorrência de correntes elétricas produzidas por reações químicas induzidas pela luz.

De fato, a observação deste efeito provocou na comunidade acadêmica o interesse e a motivação necessária para investigar tal fenômeno em sólidos, o que veio a se confirmar mais tarde com a descoberta de Adams e Day.

Posteriormente, dois seriam os motivos impulsionadores da indústria fotovoltaica: a corrida espacial, que, teve início em 1957 e logo após, o choque petrolífero, em 1973, o qual aumentou o interesse na geração de energia elétrica fotovoltaica. Por conseguinte, acreditava-se então, que a energia solar fotovoltaica poderia contribuir de modo significativo na matriz energética (CARNEIRO, 2010). De fato, tal suposição permitiu que a implementação de diversos programas de incentivos ocorresse, visando, assim, reduzir os custos de produção e o aumento da eficiência no processo de conversão de energia solar.

Em contrapartida, a década de 80 foi marcada por um mercado altamente aquecido no quesito petróleo, com preços estabilizados, contribuindo, dessa forma, negativamente para o crescimento da indústria solar. Não obstante, a indústria solar fotovoltaica continuou em ritmo lento a desenvolver novas tecnologias e processos produtivos, com objetivo principal de reduzir os custos de produção e aumento da eficiência.

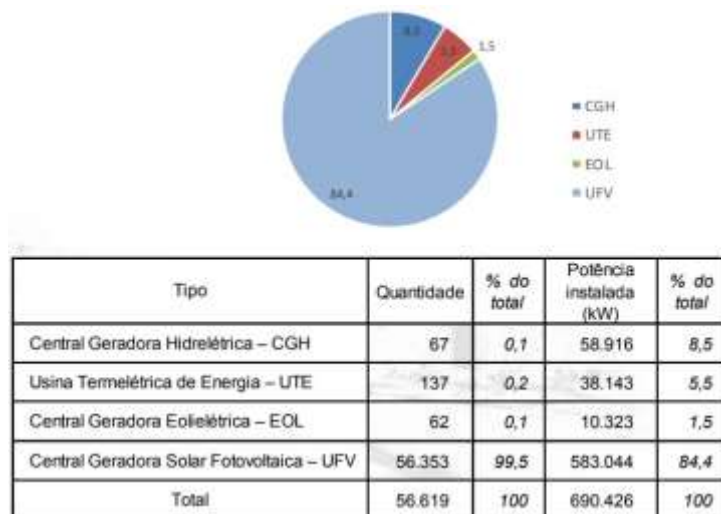
Assim sendo, com o atual enquadramento geopolítico e o baixo preço do petróleo, se fez necessária a adoção de novas políticas de produção e gestão da energia. Diante disso, a escolha pela utilização de energias renováveis, onde a energia solar fotovoltaica se insere, além de minimizar a dependência de fontes tradicionais de energia, influencia de forma positiva para um desenvolvimento sustentável.

2.2.1 Cenário Atual da Energia Solar Fotovoltaica

Desde a regulamentação da resolução nº482/2012, já foram implantadas mais de 120mil unidades consumidoras com micro e minigeração, e houve, ainda, mais de 40 % de redução no valor comercializado dos painéis fotovoltaicos, que possuem vida útil de 25 anos. A energia solar fotovoltaica, atualmente, é a fonte mais utilizada na modalidade de geração distribuída, alcançando 98% das conexões (ANEEL, 2019).

Além disso, identifica-se que o futuro da geração de energia elétrica por fontes renováveis é promissor no Brasil. Apesar de, mesmo após a aprovação da resolução nº482 e posteriormente a resolução nº 687, é possível identificar que as estimativas da ANEEL não foram atingidas em termos de volume de instalação. Em 2016, por exemplo, a ANEEL previu uma estimativa de 14.312 instalações, e foram instalados efetivamente apenas 8.004, 55,92% do previsto. Em 2017, a previsão era de 40.909 instalações, mas, apenas 21.379 unidades foram instaladas, correspondendo à 52,25%. Já em 2018, foram previstas a instalação de 82.739 unidades, sendo ao final do ano computadas 56.353 instalações, totalizando 68,11% do previsto (ANEEL, 2019). A Figura 3 ilustra o quantitativo de unidades consumidoras com geração distribuída no Brasil até o final de 2018.

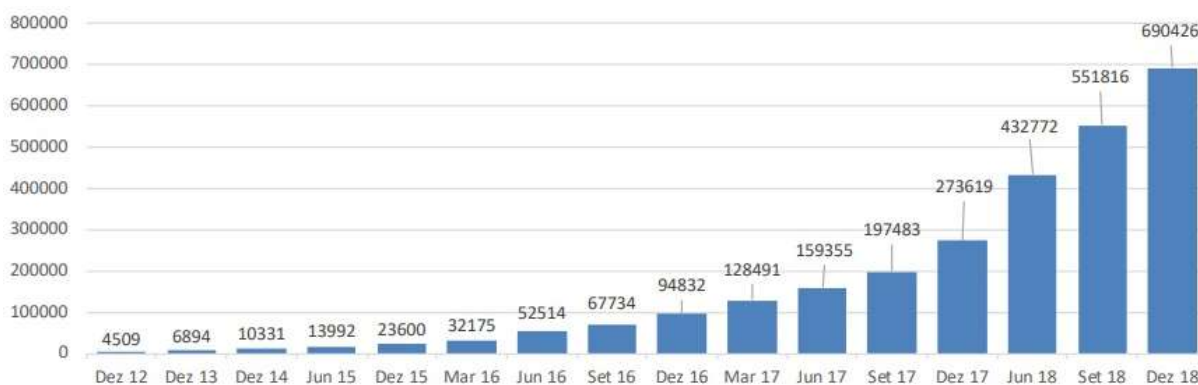
Figura 3: Quantitativo de unidade consumidoras com geração distribuída no Brasil até o final de 2018



Fonte: ANEEL, 2019

Em contrapartida ao exposto, a potência instalada superou as estimativas. Em 2016 a ANEEL estimou uma potência instalada de 53 MW, ao final do ano foi computado uma potência instalada de aproximadamente 95MW, um acréscimo de praticamente 80% sobre a previsão inicial. Em 2017 a potência superou ainda mais a prevista, visto que foram estimados 151MW de potência instalada e ao final do ano foi contabilizado 273MW, um acréscimo de quase 81%. Já em 2018 os índices foram ainda melhores, tendo a meta de 304MW de potência instalada alcançada ao final do primeiro semestre do ano, com 432MW de potência instalada, 42% acima do previsto e 690MW de potência instalada ao final do ano, totalizando um acréscimo de 127%, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4: Potência instalada até o final de 2018



Fonte: ANEEL, 2019

Em face a essa realidade, o Brasil alcançou o patamar de 1GW de potência instalada em micro e minigeração distribuída na metade do ano de 2019. Trata-se, contudo, de um grande avanço, proporcionado de forma relevante pela regulamentação da ANEEL nº482 e nº687. Devido a essas ações, o consumidor brasileiro pode produzir sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis, contribuindo, dessa forma, para uma matriz energética mais sustentável.

2.2.1.1 Energia solar fotovoltaica e sua geração distribuída

Segundo a ANEEL (2019), a fonte mais utilizada pelos consumidores/geradores é a energia solar fotovoltaica com uma quantidade de aproximadamente 145 mil unidades instaladas, seguida de termelétrica a biomassa ou biogás, com 202 instalações. O estado com o maior número de unidades consumidoras é Minas Gerais, com 32.324, seguido por São Paulo (23.492) e Rio Grande do Sul (18.786). O estado do Rio Grande do Norte aparece em 15ª lugar, com 2.181 unidades consumidoras.

Atualmente, a energia solar fotovoltaica possui uma potência instalada de aproximadamente 1.7GW. Apesar da classe de consumo comercial ficar em segundo lugar em quantidade instalada, com cerca de 26mil unidades instaladas, essa assume o primeiro o lugar no quesito potência instalada, com aproximadamente 740MW. Em seguida, com cerca de 105 mil unidades instaladas, a classe de consumo residencial assume o segundo lugar, com uma potência instalada de aproximadamente 660MW (ANEEL, 2019).

Segundo a ABSOLAR (2019), o Brasil se encontra, atualmente, na seguinte situação: 89% dos brasileiros quer gerar sua própria energia em casa, no entanto a geração distribuída representa menos de 0,01% do atendimento da demanda atual. Além disso, 79% dos brasileiros quer instalar energia solar fotovoltaica em suas casas, caso tivesse acesso a financiamentos competitivos, no entanto as condições cobradas pelas instituições financeiras inviabilizam este investimento.

Dessa forma, o financiamento é visto como o maior gargalo de mercado por mais de 75% das empresas do setor fotovoltaico, levando o país a um atraso de 15 anos frente a outros mercados (ABSOLAR, 2019).

2.3 Efeito do Sombreamento

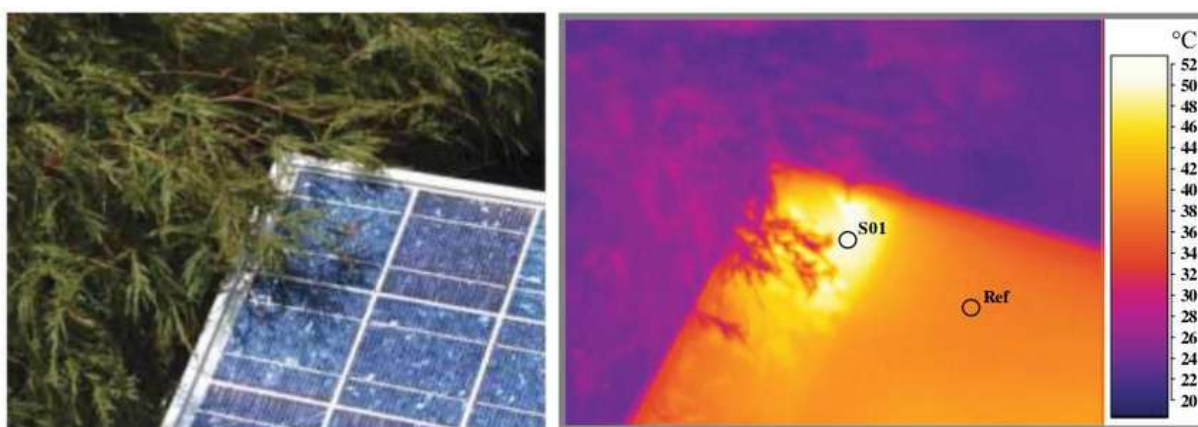
Para se obter potências elevadas em um sistema fotovoltaico, faz-se necessário o arranjo entre módulos em série e em paralelo, de forma a obter valores de tensão e corrente apropriados

para a aplicação a qual se deseja. Módulos com especificações diferentes e possíveis sombreamentos nas células podem ocasionar perdas significantes na geração de energia elétrica, ou até mesmo danos ao sistema fotovoltaico. Para evitar tais problemas indesejados, mas que podem ocorrer a qualquer momento, recomenda-se o uso de dispositivos de proteção, geralmente utiliza-se diodos, colocados em pontos estratégicos da instalação (RAMPINELLI e KRENZINGER, 2006).

Segundo Heckteuer (2002), a curva I-V resultante de um módulo seria mais simples de determinar se todas as células possuísem as mesmas características, sendo necessário apenas somar as tensões das células conectadas em série e somar as correntes das células conectadas em paralelo. No entanto, tais células são ligeiramente diferentes umas das outras ou ainda que sejam idênticas, não são uniformemente iluminadas, tornando, assim, o comportamento resultante mais complexo.

Além disso, o sombreamento de uma célula pode funcionar como uma carga para as demais células ocasionando, assim, uma dissipação de potência sobre ela e, por conseguinte, um aquecimento sobre essa. Tal fenômeno é conhecido como *hot-spot heating* (ponto quente), ver Figura 5. Para diminuir esse fenômeno são conectados diodos em antiparalelo nas saídas das células, com isso, quando uma célula estiver sombreada, o diodo será diretamente polarizado e, portanto, permitirá que a corrente circule através dele. Nesse caso, a célula sombreada não gera energia elétrica, e nem se comporta como uma carga para as demais células (RAMPINELLI e KRENZINGER, 2006).

Figura 5: Efeito do Sombreamento

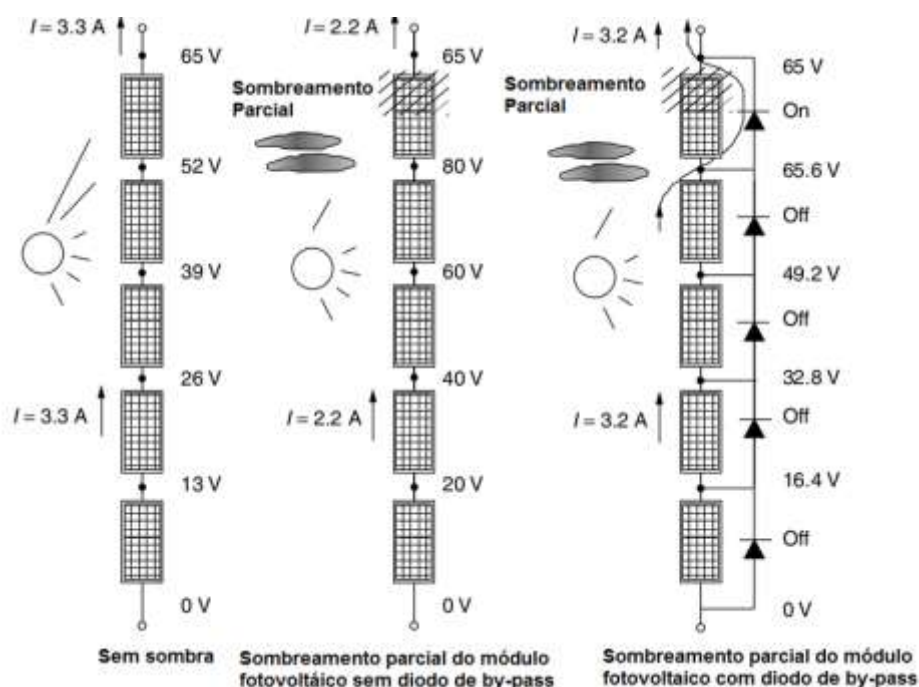


Fonte: ALONSO, 2016

No entanto, na prática os diodos não são conectados em antiparalelo com cada célula, mas sim com um grupo de células. Além disso, são protegidos contra correntes reversas de

outros painéis por meio de diodos de bloqueio conectados em série em cada um desses painéis, ver Figura 6. Essa corrente é causada devido a diferença de tensão entre os painéis pelos motivos anteriormente citados. Nesse caso, o painel que apresenta uma tensão menor que as dos demais se comporta como uma carga, afetando o restante do grupo. Assim, uma parte ou toda da corrente gerada pelos painéis com tensão maior fluirá pelo painel com menor tensão, ocasionando um aquecimento neste e perda de potência no sistema em geral. Portanto, é imprescindível o uso de diodos de bloqueios em sistemas fotovoltaicos, seja em arranjo em série seja em série/paralelo.

Figura 6: Proteção contra corrente reversa (diodo by-pass)



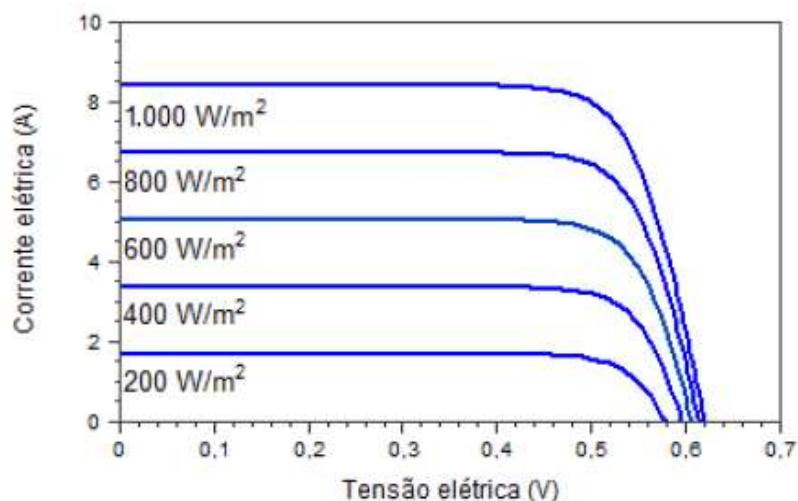
Fonte: ALONSO, 2016

2.5 Influência da Temperatura e da Irradiância Solar

Em condições de pleno funcionamento as células fotovoltaicas apresentam um comportamento que varia de acordo com a temperatura e/ou com a irradiância solar. Segundo CRESESB (2014), nos casos de alta irradiância solar, a resistência série torna-se um fator que pode reduzir a eficiência, caso a célula fotovoltaica não seja projetada para essas condições. Em contrapartida, quando os valores de irradiância solar são baixos, a resistência paralela pode reduzir ainda mais a potência elétrica gerada.

A Figura 7 ilustra como a irradiância solar afeta a curva característica I-V de uma célula fotovoltaica, mantida na temperatura de 25°C. A corrente elétrica gerada pela célula fotovoltaica tende a aumentar linearmente com o aumento da irradiância solar, enquanto que a tensão de circuito aberto aumenta de forma logarítmica, se mantida a mesma temperatura (CRESESB, 2014).

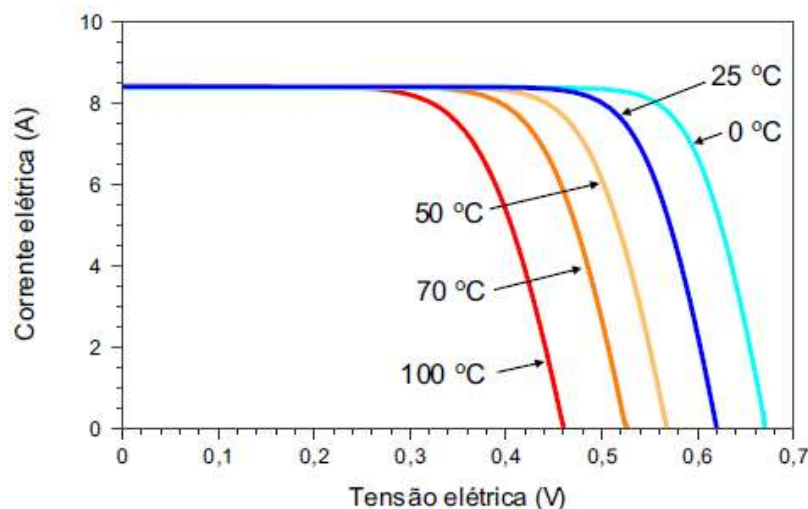
Figura 7: Influência da variação da irradiância solar na curva I-V de uma célula fotovoltaica



Fonte: CRESEB, 2014

Em paralelo ao exposto, as variações da irradiância solar e da temperatura ambiente afetam diretamente a temperatura de operação das células fotovoltaicas. A Figura 8 ilustra a curva I-V para diversas temperaturas da célula fotovoltaica, com uma irradiância de 1000 W/m². Observa-se que, o aumento da irradiância e/ou da temperatura ambiente produz um aumento da temperatura da célula e, por conseguinte, uma redução em sua eficiência. Isso se deve ao fato de que a tensão da célula diminui expressivamente com o aumento da temperatura, enquanto que sua corrente sofre uma elevação relativamente pequena. Segundo CRESESB (2014), o aumento de 100°C em uma célula de silício cristalino produz uma variação da ordem de -0,2 V (-30%) na tensão de circuito aberto e de +0,2% na corrente de curto-circuito.

Figura 8: Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V



Fonte: CRESESB, 2014

Para CRESESB (2014) a eficiência de um painel fotovoltaico não deve ser utilizada como fator determinante. A escolha de um painel fotovoltaico deve se basear em diversos fatores como custo, durabilidade, características de operação, reputação do fabricante etc. Em suma, a eficiência não deve nortear a escolha de um painel a não ser que a área disponível para instalação desse seja um fator restritivo.

2.6 Eficiência do Painel Solar

Muito tem se questionado sobre a eficiência dos painéis fotovoltaicos nos últimos anos, pois observa-se, de fato, uma grande disparidade entre os valores declarados pelas fabricantes e os valores, realmente, obtidos em pleno funcionamento.

Assim sendo, para entender tais questionamentos é necessário, primeiro, entender o que é eficiência de um painel fotovoltaico. A eficiência de um painel consiste, basicamente, em quanto (%) de energia solar (irradiância solar) o painel converte em energia elétrica, ou seja, um painel com eficiência de 15% converte 15% de energia solar incidente sobre sua superfície em energia elétrica.

Segundo Overstraeten e Mertens (1996), a eficiência de um painel fotovoltaico pode ser definida pela relação entre a potência gerada pelo painel e a irradiância incidente sobre esse. Tal eficiência pode ser obtida pela Equação 1:

$$\eta = \left(\frac{I_{mp} \times V_{mp}}{I_c \times A} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde: I_c = Irradiância solar (W/m^2)

A = Área útil do painel (m^2)

I_{mp} = Corrente de máxima potência

V_{mp} = Tensão de máxima potência

Já para Cardona e López (1999), a eficiência de um arranjo de painéis fotovoltaicos pode ser obtida por meio de uma relação entre a energia gerada no dia e a incidência de irradiância solar sobre o painel. O rendimento diário, por sua vez, pode ser obtido através da Equação 2:

$$\eta = \left(\frac{E_{pv,d}}{E_{r,d}} \right) \quad (2)$$

Onde: $E_{pv,d}$ = Energia diária fornecida pelo painel fotovoltaico.

$E_{r,d}$ = Irradiância diária na superfície do arranjo fotovoltaico.

Embora existam diversas formas de se obter a eficiência de um painel fotovoltaico. A forma padrão escolhida pelas fabricantes é denominada de STC (*Standard Testing Conditions*), traduzindo para o português significa, Condições de Teste Padrão. Esse tipo de teste consiste em, calibrar uma fonte de luz para 1000 W/m^2 , uma temperatura padrão de 25°C , além de uma massa de ar de 1.5. Assim, quando um painel sai da linha de produção, esse é colocado em uma “mesa de teste” e são conectados os fios positivo e negativo a um dispositivo de medição. O painel então é submetido aos testes e os componentes eletrônicos conectados ao painel registram vários valores de desempenho, entre eles a tensão do painel (Volts), corrente (amperes) e a potência (watts). Esse último valor, por sua vez, é tido como referência ao se dimensionar um sistema fotovoltaico (DURRENBERGER, 2015).

Contudo, por mais que o STC seja um padrão utilizado pelas fabricantes, essa condição de teste não retrata normalmente as condições climáticas que na prática são bastante diferentes. Por isso, essa condição de teste não é ideal para calcular a eficiência dos painéis e sim, para distinguir os painéis fabricados. Isto é, as fabricantes utilizam-se desse teste para a classificação dos painéis de acordo com sua potência como, por exemplo, painéis de 240 a 245 Watts possuem a mesma classificação de painéis de 245 Watts e assim por diante. Logo, esse teste fornece apenas uma indicação aproximada de como os painéis se comportarão no uso real.

Assim sendo, em meados da década de 1990, sob a direção do NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), laboratório nacional de energia renovável, foi desenvolvido um conjunto de condições de teste para medir o desempenho de painéis fotovoltaicos sob condições de “mundo real”. Essas condições foram denominadas de PVUSA (*Photovoltaics for*

Utility Scale Applications Test Conditions), traduzindo para o português significa, Condições de Teste de Energia Fotovoltaica para Aplicação em Escala de Utilidade, mais conhecido como PTC (*Photovoltaics Test Conditions*).

Para DURRENBERGER (2015), a principal diferença entre o teste STC e o PTC é a temperatura, no qual são realizados os testes. Enquanto que o STC realiza os testes com uma temperatura de 25°C o PTC usa uma temperatura mais próxima ao “mundo real” de 45°C. Dessa forma, os testes com base no padrão PTC são realizados simulando um painel em pleno funcionamento, ou seja, as células fotovoltaicas dentro do painel são elevadas para a temperatura de operação, que fica em torno de 45°C. A temperatura ambiente é ajustada para 20°C e a velocidade do vento para aproximadamente 1m/s.

Por conseguinte, por causa do princípio de funcionamento dos painéis fotovoltaicos, à medida que esses são aquecidos, a tensão produzida tende a diminuir. E, como a energia elétrica gerada (watts) é igual a tensão multiplicada pela corrente, quando a tensão diminui, a corrente por consequência diminui. Portanto, o padrão PTC é uma excelente técnica a ser utilizada em dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, pois ajuda a prever com mais precisão seu desempenho.

Ademais, também é possível calcular a eficiência do painel, considerando o efeito da perda por temperatura, a partir do cálculo da potência estimada comparando-a com a potência real do sistema fotovoltaico. Essa potência estimada é decorrente da potência instalada, do coeficiente de eficiência do painel, da irradiância solar e do coeficiente de perda, conforme a Equação 3.

$$Pot_{est} = P_{kWp} * 0,8 * Irr * perda \quad (3)$$

Onde: P_{kWp} : Potência fornecida pela fabricante;

Irr: Irradiância Solar;

Perda: Perdas referente à temperatura e o coeficiente de perdas.

A temperatura na superfície de um painel fotovoltaico é inversamente proporcional a sua eficiência, quanto mais quente é a superfície de um painel menos eficiente esse será. Esse conceito está relacionado com o coeficiente de temperatura P_{max} , o qual demonstra o quanto de energia um painel perde para cada °C que este estiver acima dos 25°C, conforme a Equação 4, baseando-se no padrão STC.

$$Perdas = 1 - (Temp_{painel} - 25^{\circ}C) * NOTC \quad (4)$$

Onde: $Temp_{painel}$: Temperatura na superfície do painel fotovoltaico;

$NOTC$: Temperatura nominal de operação da célula fotovoltaica.

Assim sendo, existem diversas técnicas para se obter o melhor rendimento de um painel fotovoltaico, como é o caso do classificador *fuzzy*, que tem a capacidade de converter de forma prática a experiência de um especialista em uma linguagem compreensível pelos computadores

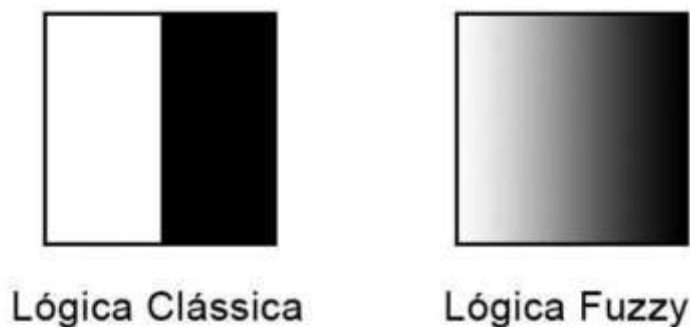
2.7 Lógica Fuzzy

A aplicação de controle e automação tem sido uma das mais importantes tecnologias utilizadas no decorrer da revolução industrial – se não há mais importante –, desde os modestos níveis de processos movidos a motores a vapor, ao atual estado, no qual há uma interação intrínseca com sistemas controláveis e processos de fabricação. No transcorrer dessa transformação, promovida, em grande parte, pela teoria de controles, a modelagem matemática foi baseada única e exclusivamente em um modelo linear. Não obstante, como sempre ocorre na ciência, tal modelagem já não supria, de fato, todas as lacunas da natureza de forma precisa, tornando-se, assim, uma tarefa árdua ou até mesmo impossível (Simões e Shaw, 2007).

De fato, a modelagem matemática dos processos da natureza é completamente imprecisa, indiferente aos esforços humano, sendo frequentemente possível que um operador seja capaz de controlar tal processo sem mesmo compreender a matemática. Esse operador, no entanto, possui conhecimento suficiente para manejar variáveis de entrada que influenciem as saídas do processo. Tal realização levou a uma nova perspectiva no tocante à teoria de processos industriais, surgindo então o conceito de Inteligência Artificial, o qual tem como objetivo precípua emular o comportamento humano no controle de processos. A inteligência artificial, assim, compreende um leque de ferramentas para solucionar problemas complexos e incertos, e as técnicas *fuzzy* e *neurofuzzy* tem se mostrado, e se firmado, como ferramentas fundamentais no controle de processos industriais (Simões e Shaw, 2007).

Em 1973, Zadeh apresenta a Teoria da Lógica *Fuzzy*. Tal teoria teve como objetivo resolver problemas que era considerado de natureza contínua, e que a lógica booleana não conseguia tratar, ver Figura 9. A partir dessa lógica é possível modelar computacionalmente termos ou variáveis que possuem um valor lógico intermediário entre falso (zero) ou verdadeiro (um) (KRIDI et al 2011).

Figura 9:Diferença entre a lógica clássica e a lógica *fuzzy*



Fonte: AOKI, 2014

Segundo Simões e Shaw (2007), a lógica *fuzzy* (também conhecida como lógica nebulosa ou lógica difusa) consiste em tratar de um raciocínio que busca classificar em números uma determinada realidade ou situação, que trabalha com múltiplas variáveis incertas, a fim de facilitar ou reduzir a complexidade de determinada tarefa. Além disso, a lógica *fuzzy* tem a capacidade de transformar expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em valores numéricos. Dessa maneira, é possível converter de forma prática a experiência de operadores humanos, em uma linguagem compreensível pelos computadores. Assim, um sistema *fuzzy* possui um imenso valor prático, no qual se torna possível a inclusão de operadores humanos em classificadores, possibilitando, de tal forma, estratégias de tomadas de decisão em problemas complexos.

Devido a sua flexibilidade e robustez, a lógica *fuzzy* tem comprovado ser uma ferramenta fundamental para a formação de engenheiros, na comunicação homem-máquina e em sistemas de tomadas de decisão. Assim sendo, a principal característica da lógica *fuzzy* é que essa não necessita de uma modelagem matemática exata. De fato, propor uma modelagem matemática que classifique as variáveis da natureza como irradiância solar, temperatura, angulação solar, entre outras, pode ser pouco efetiva e muito complexa. Destarte, a lógica *fuzzy* atua como uma heurística que toma decisões mais razoáveis a situação de acordo com as experiências do operador humano (Simões e Shaw, 2007).

2.4.1 Conjuntos *Fuzzy*

Na teoria clássica de conjuntos um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas, pode-se aplicar um conjunto de possíveis entradas, afim de se obter as respectivas saídas (Simões e Shaw, 2007). Ou seja, são definidos limites precisos, que, por meio de uma função

característica, determina se um elemento pertence ou não a um conjunto (LEAL, 2011). A teoria dos conjuntos consiste basicamente em estudar como as estradas afetam as saídas, isto é, como a entrada é mapeada na saída pelo referido sistema.

No entanto, existem classes de elementos que não são precisamente definidos sobre esses critérios de pertinência. Zadeh, (1965) apresenta a teoria dos conjuntos *fuzzy*, a qual determina um grau de pertinência que mostra o quanto um determinado elemento pertence a um determinado conjunto. Segundo Simões e Shaw (2007), tal grau de pertinência é definido por meio de uma função característica, ou função de pertinência, mapeada por $\mu_A: U \rightarrow [0,1]$, que associa a cada $x \in U$ (universo de discurso) um número real $\mu_A(x)$ no intervalo de $[0,1]$ ao invés dos valores booleanos: verdadeiro (1) e falso (0).

Além disso, os conjuntos *fuzzy* são definidos em um universo de discurso, que pode ser contínuo ou discreto, sendo representados pelas equações (5) e (6):

- Discreto:

$$\sum_i^n 1\mu_A(xi)/xi \quad (5)$$

- Contínuo:

$$\int_x \mu_A(x)/x \quad (6)$$

2.4.2 Variáveis Linguística

Uma variável linguística é definida em um conjunto de termos, nomes ou rótulos, com cada valor sendo um número *fuzzy* (Simões e Shaw, 2007). Por meio de uma variável linguística é possível caracterizar valores, em geral, mais próximos da linguagem natural do ser humano (LEAL, 2011). Por exemplo, ao dizermos que a temperatura está quente, é menos preciso do que quando dizemos que a temperatura está medindo 30°C. Nesse sentido, o rótulo de quente pode ser considerado como um valor linguístico da variável temperatura, com o entendimento de que ele desempenha o mesmo papel que o valor numérico 30°C, entretanto, menos preciso e, conseqüentemente, menos informativo.

O nome de uma variável linguística consiste basicamente no nome ao qual determinada variável será chamada, isto é, qual rótulo será associado a determinada variável linguística. De acordo com o exemplo sobre a temperatura quente, o nome da variável linguística é “Temperatura”.

O universo de discurso consiste no domínio no qual cada variável linguística será definido. No caso da variável linguística temperatura, seu universo de discurso pode corresponder, por exemplo, ao intervalo de $[-40,50]$.

De acordo com Simões e Shaw (2007), as funções de pertinência representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de sistemas *fuzzy*. Assim, as funções de pertinência podem apresentar diversas formas, dependendo do conceito e do contexto que serão utilizadas. Ou seja, uma função de pertinência associa cada elemento de um universo de discurso para um número no intervalo $[0,1]$, que demonstra o grau de pertinência deste elemento em relação ao conjunto *fuzzy* analisado, tal função de pertinência, geralmente, é representada por $\mu(x)$.

Retomando ao exemplo da temperatura, a variável linguística temperatura possui o rótulo quente, que constitui um conjunto *fuzzy* formado pelos elementos do universo de discurso que possui grau de pertinência menor que zero e maior que zero, de acordo com a função de pertinência caracterizada para este conjunto. Por exemplo, o grau de pertinência dos valores numéricos das temperaturas 30°C , 26°C e 23°C em relação ao conjunto quente seria respectivamente 1, 0.55 e 0.3, o que significa dizer que, a temperatura 30°C possui um grau de pertinência maior ao conjunto quente do que a temperatura de 26°C e 23°C .

Nota-se também que não existe uma transição brusca entre a temperatura ser quente e não ser, ocorrendo, assim, de forma gradativa de acordo com o aumento da temperatura.

Os dois exemplos de funções de pertinência mais utilizados na modelagem *fuzzy* são a triangular e a trapezoidal, no qual o eixo vertical representa o intervalo de $[0,1]$ e o eixo horizontal o universo de discurso.

O tipo de função de pertinência em um universo de discurso e o seu formato são determinados com base em experiências, na natureza do processo a ser controlado, ou a partir de dados obtidos de um operador especializado, que realiza as operações de controle manualmente.

Com relação ao quantitativo de conjuntos *fuzzy* linguísticos (funções de pertinência), Simões e Shaw (2007) diz o seguinte:

Quanto maior o número de conjuntos, maior a precisão, mas a demanda computacional também é mais significativa. Por exemplo, experiências mostraram que uma mudança de 5 conjuntos triangulares para 7 aumenta a precisão em torno de uns 15%, a partir de valores maiores não há melhorias extremamente significativas.

Além disso, as funções de pertinência não carecem de ser simétricas ou igualmente espaçadas, uma vez que, cada variável pode ter um conjunto de funções de pertinência diferente, com diversos formatos e distribuições.

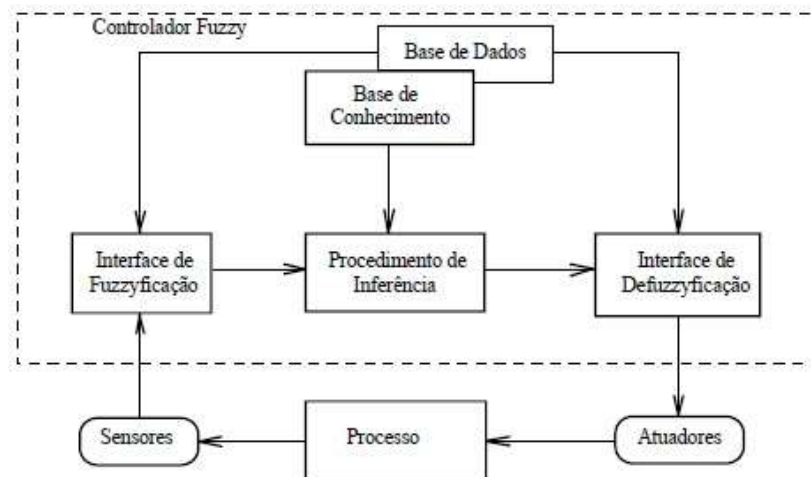
2.4.3 Sistema *Fuzzy*

O propósito principal de um sistema *fuzzy* é modelar as variáveis a partir de conhecimento especialista, ao invés de, necessariamente, modelar o processo em si.

Um sistema *fuzzy* é representado pela Figura 12 sendo composto basicamente dos seguintes blocos funcionais:

- Interface de fuzzificação;
- Base de conhecimento;
- Base de dados;
- Procedimento de Inferência (tomadas de decisões);
- Interface de defuzzificação.

Figura 10: Controlador *Fuzzy*



Fonte: BARG, 2002

Para Simões e Shaw (2007), essa estrutura representa a base da lógica fuzzy, na qual ocorre a transformação no domínio do mundo real, que usa números reais, para o domínio *fuzzy*, que usa variáveis linguísticas. Tal transformação utiliza um conjunto de inferências *fuzzy* para as tomadas de decisões, e por fim ocorre a defuzzificação que consiste na transformação inversa do domínio *fuzzy* para o domínio do mundo real.

Para Welstead (1994), um sistema de controle *fuzzy* consiste na combinação de conjuntos *fuzzy* definidos por variáveis linguísticas de entrada e saída, junto com o conjunto de regras, que por sua vez, interligam um ou mais conjuntos *fuzzy* de entrada com um conjunto *fuzzy* de saída.

Partindo deste princípio, o núcleo de um controlador só analisa variáveis *fuzzy*. Os dados recebidos precisam ser transformados em variáveis *fuzzy* ou “fuzzificadas” (transformadas em conjuntos *fuzzy*). A interface de fuzzificação recebe os valores das variáveis de entrada, efetua um escalonamento para condicionar os valores a universos de discursos e fuzzifica os valores, transformando, assim, números em conjuntos *fuzzy*, de modo que possam se tornar instâncias de variáveis linguísticas.

Enquanto que a base de conhecimento consiste basicamente nas regras *fuzzy*, caracterizando, dessa forma, a estratégia de controle e suas metas. A base de dados consiste no armazenamento das definições necessárias sobre discretizações e normalizações dos universos de discurso, as partições *fuzzy* dos espaços de entrada e saída e as definições das funções de pertinências (BARG, 2002).

Assim, o comportamento dinâmico de um sistema *fuzzy*, em geral, é modelado por meio de regras *fuzzy*. Tais regras são representadas por meio de implicações lógicas de forma “se--então”, representando uma relação entre um ou mais antecedentes ou consequentes, e são usadas para mapear as informações de um determinado sistema descrevendo, assim, a dependência entre as variáveis de entrada e saída (LEAL, 2011). Ademais, as regras *fuzzy* são baseadas no conhecimento e na experiência de um operador ou especialista da área (KRIDI et al, 2011). As bases de regras *fuzzy* são definidas da seguinte forma:

$$Se \ (antecedente(s)) \ então \ (consequente(s))$$

O antecedente de uma regra é composto por um conjunto de condições, no qual quando o grau de pertinência entre a variável de entrada e o termo primário do antecedente for maior que zero, aciona a inferência do consequente. Este, por sua vez, é composto por um conjunto de ações, que são processadas para gerar uma decisão para cada variável linguística de saída, ou seja, o antecedente e o consequente de uma regra *fuzzy* são posições contendo variáveis linguísticas (LEAL, 2011).

$$Se \ (A) \ é \ (a) \ e \ (B) \ é \ (b) \ então \ (C) \ é \ (c)$$

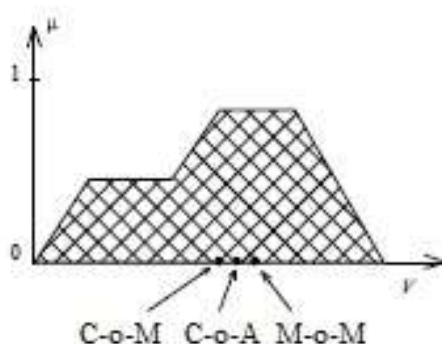
As bases de regras podem ser classificadas como sistema conjuntivo e sistema disjuntivo (LEAL, 2011). Enquanto este consiste no conjunto de regras onde a satisfação de pelo menos uma regra é requerida – as regras são conectadas pelos conectivos “ou” –, aquele é formado por

regras que devem ser comumente satisfeitas, neste caso elas usam conectivos “e”. Por conseguinte, as bases de regras *fuzzy* e as bases de dados (variáveis linguísticas) formam a base de conhecimento de um sistema *fuzzy* (KRIDI et al, 2011).

Já o procedimento de inferência atua juntamente às regras *fuzzy* de entrada, de modo a inferir sobre as ações de controle *fuzzy*, usando o operador de implicação *fuzzy* (SE e ENTÃO) e as regras de inferências da lógica *fuzzy* (BARG, 2002). Assim, o módulo de inferência do sistema *fuzzy* irá associar os conjuntos atingidos na fuzzyficação da entrada aos conjuntos correspondentes na saída, sempre se baseando nas regras que foram modeladas previamente (KRIDI et al, 2011).

E por fim, mas não menos importante, na interface de defuzzyficação o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras *fuzzy* será traduzido em um valor discreto, utilizável na ação de controle no mundo real. Tal função apenas é necessária quando a saída do controlador tiver de ser interpretada como uma ação de controle discreta, e.g. configurar um seletor numa determinada posição ou mover um motor para uma determinada posição pré-definida (Simões e Shaw, 2007). Assim, para selecionar o método apropriado, pode-se utilizar um enfoque baseado no centroide ou nos valores máximos que ocorrem da função de pertinência resultante. Apesar de não existir nenhum procedimento sistemático para a escolha da melhor estratégia de defuzzyficação, as mais comuns, ver Figura 13, incluem: (1) Centro-da-Área (C-o-A), que retorna o centro de área da função inferida, (2) Centro-do-Máximo (C-o-M), que escolhe o ponto onde a função inferida tem seu máximo e Média-do-Máximo (M-o-M), que representa o valor médio dentre todos pontos de máximo quando existe mais de um máximo.

Figura 11: Tipos de defuzzyficação



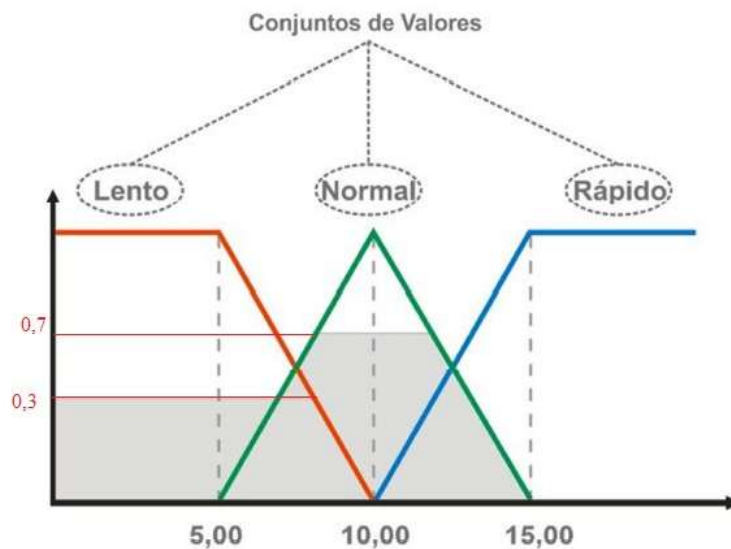
Fonte: Adaptado de GOMIDE, 1995.

2.4.4 Centro-da-Área (C-o-A)

O método Centro-da-Área também conhecido como Centro-de-Gravidade, é um dos métodos mais utilizados, pois calcula o centroide da área composta que representa o termo de saída *fuzzy* ($\mu_{saída}$) tal termo é composto pela *união* de todas as contribuições das bases de regras *fuzzy* (Simões e Shaw, 2007). O centroide é um ponto que divide a área de saída *fuzzy* em duas partes iguais. A Figura 14 mostra as funções de pertinência de uma variável linguística de saída. Assumindo que existam três funções de pertinência e que uma saída *fuzzy*, resultante das regras de inferência *fuzzy*, tenha sido:

Lento=0,3; Normal=0,7; Rápido=0,0.

Figura 12: Saída de um Controlador *Fuzzy*



Fonte: Adaptado de KRIDI, 2011.

A saída *fuzzy* é ambígua, pois as duas funções de pertinência (Lento e Normal) tem graus de pertinência não-nulos. Lembrando que os conjuntos *fuzzy* são combinados de acordo com as bases de regras da teoria de conjuntos. A Figura 13 mostra as áreas de Lento e Normal combinadas pelo operador de união. Assim, o método Centro-de-Área calcula o centroide desta área. O cálculo do centroide da área se dá por meio da Equação 7:

$$C-o-A = \frac{\sum_{j=1}^N \mu_i \cdot \mu_{saída}(\mu_i)}{\sum_{j=1}^N \mu_{saída}(\mu_i)} \quad (7)$$

Onde $\mu_{saída}$ é a área de uma função de pertinência, e.g. Lento e Normal, modificada pelo resultado da inferência *fuzzy*, e.g. 0,3 e 0,7 respectivamente, e μ_i é a posição do centroide da função de pertinência individual, com isso, tal equação calcula o centroide composto, no qual contribuem as duas funções de pertinência indicadas, como é visto na Figura 15.

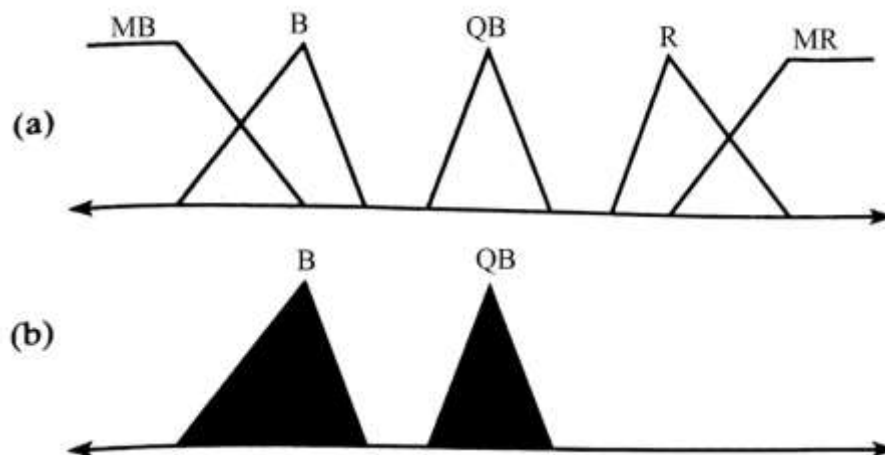
Figura 13: Cálculo do Centroide



Fonte: KRIDI, 2011.

Por outro lado, o método Centro-da-Área apresenta algumas desvantagens, uma delas ocorre quando as funções de pertinências não possuem sobreposição, ver Figura 16, onde o centro de gravidade não tem significado físico. Além disso, se mais de uma regra tiver a mesma saída *fuzzy* há uma sobreposição de áreas que não será contabilizada e, em adição a isso, a necessidade de integração numérica requer esforço computacional para determinada tarefa (Simões e Shaw, 2007).

Figura 14: Sobreposição de áreas



Fonte: Adaptado de Simões e Shaw, 2007.

2.4.5 Centro-do-Máximo (C-o-M)

O método Centro-do-Máximo também conhecido como defuzzificação pelas alturas, calcula os picos das funções de pertinências (ponto máximo) representados no universo de discurso da variável de saída. Os valores não-nulos das regras de inferência de saída são posicionados nos picos correspondentes. Cada valor recebe um peso, assim, o valor de saída defuzzificado, discreto, é determinado achando-se o ponto de apoio onde os pesos ficam equilibrados. Dessa forma, as áreas das funções de pertinência não desempenham nenhum papel e apenas os pontos máximos são usados.

O valor de saída é calculado através da média ponderada dos máximos, cujos pesos são os resultados da inferência. O cálculo do valor defuzzificado é realizado através da Equação 8, onde $\mu_{saída}(\mu_i)$ indicam os pontos em que ocorrem os máximos das funções de pertinência.

$$C-o-M = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_i \cdot \sum_{k=1}^N \mu_{saída}(\mu_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \mu_{saída}(\mu_i)} \quad (8)$$

2.4.6 Média-do-Máximo (M-o-M)

Uma outra forma de se calcular o valor *fuzzy*, discreto, é obtendo o maior valor de pertinência da saída $\mu_{saída}(\mu_i)$. Não obstante, em casos onde a função de pertinência consiste em mais de um máximo este método não pode ser utilizado. Além disso, a média do máximo não é muito precisa, devido à necessidade de se escolher qual máximo utilizar. O cálculo da média do máximo é realizado através da Equação 9.

$$M-o-M = \sum_{m=1}^M \frac{\mu_m}{M} \quad (9)$$

Onde μ_m é o m-ésimo elemento no universo de discurso, onde a função $\mu_{saída}(\mu_i)$ tenha um máximo e M é o número total desses elementos. Tal método também é chamado de solução mais plausível, por desconsiderar o formato das funções de pertinência de saída (Simões e Shaw, 2007).

2.5 Internet of Things (IoT)

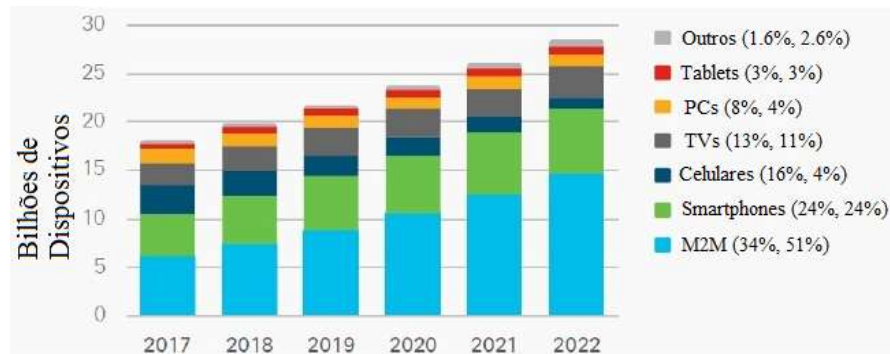
A difusão de objetos inteligentes com capacidade de sensoriamento, comunicação e processamento tem-se expandido nos últimos anos. Neste contexto, a *IoT* ou Internet das Coisas – tradução livre para o português – conecta tais objetos à *Internet* promovendo, dessa forma, a comunicação entre usuários e dispositivos. A *IoT* possibilitou o desenvolvimento de inúmeras aplicações, as quais tanto o meio acadêmico quanto a indústria estão se beneficiando, sendo elas cidades inteligentes, saúde, automação de ambientes, supervisionamento de indústrias dentre outras (SANTOS et.al, 2016). Por outro lado, ainda existem diversas barreiras a serem enfrentadas como, por exemplo, restrições dos objetos inteligentes (memória, processamento de dados), largura de banda limitada e dimensão do hardware.

Antes de prosseguirmos a respeito das barreiras a serem enfrentadas se faz necessário um breve introito sobre Internet das Coisas. A Internet das Coisas – do inglês *Internet of Things* - *IoT* – surgiu dos avanços de diversas áreas, tais como sistemas embarcados, microeletrônica, comunicação e sensoriamento. De fato, a *IoT* vem ganhando destaque tanto no meio acadêmico quanto no meio industrial, devido ao seu potencial nas mais variadas áreas das atividades humanas.

Consoante Santos et.al (2016), a Internet das Coisas, nada mais é que uma extensão da Internet atual, que proporciona aos objetos do dia a dia capacidade computacional e de comunicação de conectassem à Internet. Assim, a conexão com a Internet possibilita, primeiro, controlar remotamente os objetos e, segundo, permite que os próprios objetos sejam acessados como provedores de serviços. Tais possibilidades geram grandes oportunidades tanto no âmbito acadêmico quanto no industrial. Não obstante, estas habilidades apresentam riscos e acarretam amplos desafios técnicos e sociais.

Atualmente, não só computadores convencionais estão conectados à Internet, como também uma grande diversidade de equipamentos tais como TVs, Notebooks, Automóveis, Smartphones e a lista aumenta a cada dia. Neste cenário, a pluralidade é crescente e segunda a companhia Cisco, uma das maiores e mais relevantes empresas de tecnologia do mundo, previu que em 2022 mais de 28 bilhões de dispositivos estarão conectados à Internet até 2022, ver Figura 17.

Figura 15: Previsão de dispositivos conectados à Internet até 2022

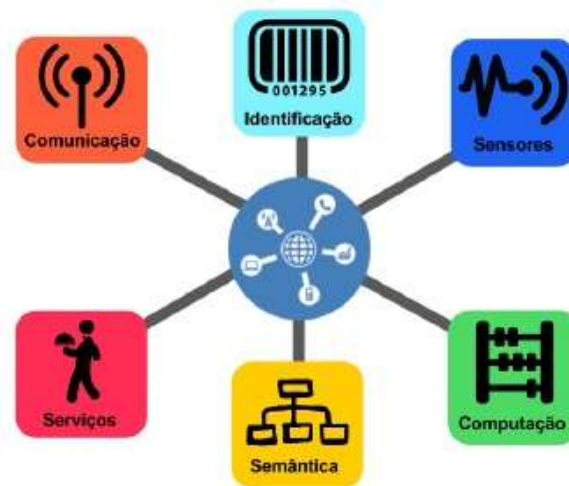


Fonte: Cisco VNI Mobile, 2019

Concomitantemente, uma gama de novas possibilidades de aplicações surge, e.g. cidades inteligentes (*Smart Cities*), saúde (*Healthcare*), casas inteligentes (*Smart Home*) aliado a esses fatores emergem desafios como regulamentações, segurança, padronizações. Além disso, é válido lembrar que um dos elementos cruciais para o sucesso da *IoT* encontra-se na padronização das tecnologias. Tal critério permitirá que a diversidade de dispositivos conectados à Internet cresça, tornando a *IoT* uma realidade no dia a dia (SANTOS et.al, 2016).

A *IoT*, como mencionado anteriormente, pode ser vista como a combinação de diversos dispositivos, os quais são complementares no sentido de viabilizar a integração dos objetos no ambiente físico ao mundo virtual. A Figura 18 apresenta os blocos básico de construção da *IoT* sendo eles:

Figura 16: Estrutura básica da *IoT*



Fonte: SANTOS et.al, 2016.

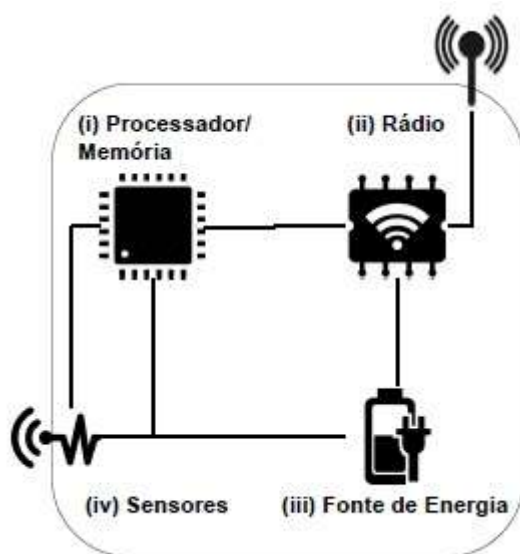
- **Identificação:** Um dos blocos mais importantes, uma vez que é imprescindível a identificação dos objetos para conectá-los à Internet.

- **Sensores:** Os sensores coletam informações sobre o cenário onde os objetos se encontram e, em seguida, armazenam/transmitem tais dados para um centro de armazenamento – que pode ser um servidor local ou até mesmo um *datalogger* –.
- **Comunicação:** Está relacionado com as diversas técnicas para conectar os objetos inteligentes. Algumas dessas tecnologias usadas são o *wifi*, *Bluetooth* e *RFID*.
- **Computação:** Consiste na unidade de processamento, e.g. microcontroladores, processadores e FPGAs, responsáveis por executar algoritmos locais nos objetos inteligentes.
- **Serviços:** A *IoT* dispõe de diversas classes de serviços, dentre elas, destacam-se os Serviços de Identificação, responsáveis por mapear Entidades Físicas (interesse do usuário) em Entidades Virtuais, e.g. a temperatura de um local físico em seu valor.
- **Semântica:** Consiste em extrair conhecimentos dos objetos na *IoT*. Refere-se a descoberta de conhecimento e uso eficiente dos recursos existentes, a partir dos dados existentes, com a finalidade de prover determinado serviço.

2.5.1 Arquiteturas básica dos dispositivos

Segundo SANTOS et al (2016), a arquitetura básica de um dispositivo inteligente é composta por quatro unidades: processamento, comunicação, energia e sensores, ver Figura 19.

Figura 17: Arquitetura básica de um dispositivo inteligente



Fonte: SANTOS et al. 2016

2.5.1.1 Processamento

A unidade de processamento é composta por uma memória interna para armazenamento de dados e programas, um microcontrolador e um conversor analógico-digital (ADC) para receber sinais dos sensores. Os processadores utilizados nesses dispositivos são, em geral, os mesmos utilizados em sistemas embarcados e comumente não apresentam alto poder computacional. Tais processadores possuem, geralmente, uma memória externa do tipo *flash*, que serve como memória secundária. As principais características destas unidades são consumo reduzido de energia e espaço reduzido, além de um baixo custo.

2.5.1.2 Comunicação

A comunicação refere-se a pelo menos um canal com ou sem fio, sendo mais comum em aplicações de *IoT* o meio sem fio. Sendo este último mais utilizado por meio de rádios de baixo custo e baixa potência, além de controladores como, por exemplo, o Arduino. Como consequência, tal comunicação é de curto alcance e apresentam perdas frequentes.

2.5.1.3 Fonte de Energia

Responsável por fornecer energia aos componentes do dispositivo inteligente. Normalmente, a fonte de energia consiste de uma bateria (recarregável ou não) e tem a função de alimentar os componentes. Entretanto, existem outras fontes de alimentação como a energia solar, na qual captura a energia do ambiente através de técnicas de conversão, conhecidas como *energy harvesting*.

2.5.1.4 Sensores

Realizam o monitoramento do ambiente no qual o dispositivo se encontra. Os sensores capturam valores de grandezas físicas como temperatura, umidade. Atualmente, existem inúmeros sensores no mercado capazes de capturar diversas grandezas, frequentemente utilizando em sistemas de monitoramento.

2.7 Sistema de Monitoramento

Ao se desenvolver um sistema automatizado, se torna imprescindível o uso de uma interface para o monitoramento e controle das variáveis do processo, cujo qual está sendo controlado. Essa interface é denominada IHM, um acrônimo para Interface Homem Máquina. Interfaces essas que podem ser feitas de várias formas, como por exemplo:

- Usando LED's;
- Displays;
- Teclado e botões para controle;
- Através de softwares de supervisionamento.

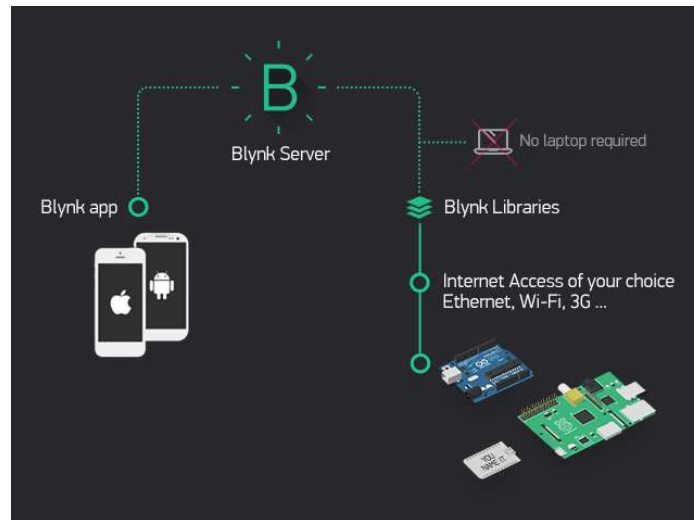
Os supervisórios transmitem informações por meio de algum tipo de protocolo de comunicação, criando assim, uma interface de monitoramento remoto e controle. No entanto, apesar de haver plataformas que podem ser usadas em conjunto com microcontroladores, tal como o *Blynk*, *ScadaBR* a grande maioria, ainda, é destinada ao setor industrial. Tornando o monitoramento de sistemas fotovoltaicos restritos a grandes usinas geradores de energia elétrica por causa do custo elevado dos equipamentos.

2.7.1 Plataforma Blynk

A plataforma Blynk é baseada em um aplicativo personalizável que permite controlar remotamente um hardware programável, assim como reportar dados do hardware ao aplicativo. Através de componentes preexistentes, o aplicativo Blynk disponibiliza uma vasta gama de possibilidades de criação de supervisórios para variadas finalidades.

O Blynk é composto por três partes essenciais, como é visto na Figura 20.

Figura 18: Estrutura da plataforma Blynk



Fonte: docs.blynk.cc

- Blynk App: Ambiente no qual é criado o supervisor;
- Blynk Server: É um servidor Java de código aberto, responsável por transmitir dados entre o aplicativo móvel Blynk e diversos microcontroladores como, por exemplo, o Arduino, Raspberry.
- Biblioteca Blynk: Permite a comunicação com o servidor e processam todos os comandos de entrada e saída.

O servidor Blynk, como citado anteriormente, é o responsável por todas as comunicações entre o dispositivo móvel (smartphone ou tablet) e o hardware. Esse servidor pode ser o próprio fornecido pela Plataforma Blynk, como também pode ser criado um servidor privado. Ambos possuem vantagens e desvantagens. O servidor próprio do Blynk possui como vantagem acesso ao supervisor em qualquer lugar, desde que esteja com *Internet*. No entanto, o usuário não tem garantia que o servidor fique *online* sempre. Já o servidor privado possui como vantagem a garantia de sempre ficará *online*. Em contrapartida, não é possível acessá-lo em qualquer lugar, apenas em um raio de 200m do ponto de internet (roteador).

2.9 Trabalhos Relacionados

BEHRENS et al (2016) apresentaram, no Simpósio Brasileiro de Tecnologia, um sistema para monitoramento das grandezas (tensão, corrente, temperatura e irradiância solar) de operação de um sistema fotovoltaico, tendo como objetivo a verificação da eficiência gerada pelos painéis solares. O sistema fora composto por um painel fotovoltaico de 175W, sensores de tensão, de corrente, de temperatura e de irradiância solar e um módulo controlador que se comunica com um sistema supervisório no qual os dados são coletados, armazenados e processados para a visualização e tomada de decisões. Consoante BEHRENS et al, a eficiência de um sistema fotovoltaico pode ser monitorada em função da potência elétrica gerada, da temperatura de operação e da variação da irradiância solar incidente nos painéis.

DUARTE et al (2019) desenvolveram um supervisório para monitoramento da geração de energia elétrica fornecida pelos painéis fotovoltaicos. Tal supervisório fora desenvolvido pensando-se no baixo custo, uma vez que, a instalação de um sistema fotovoltaico, atualmente, ainda possui um custo elevado. Partindo desse princípio, foi utilizado o microcontrolador PIC 18F e a plataforma *Microsoft Visual Studio* para a criação do supervisório. Segundo DUARTE et al, os resultados apresentados foram bastante satisfatórios para um sistema de baixo custo. No entanto, a escolha dos sensores é de extrema importância para o projeto, uma vez que a escolha errada poderá levar a dados com erro acima do tolerado e a um sistema instável.

HALMEMAN (2014) em sua tese de doutorado desenvolveu um sistema para monitoramento da produção e consumo de energia elétrica em centrais de microgeração fotovoltaicas. O sistema fora composto por um Arduino e sensores de tensão e de corrente. A transmissão dos dados foi feita via rede sem fios (*ZigBee*) para um central de dados na qual um microcomputador gerencia e armazena os dados transmitidos. O monitoramento da central é realizado por meio de uma página *Web*. Consoante HALMEMAN, o sistema apresentou eficiência de 96%, sendo considerada satisfatória para sistemas de microgeração fotovoltaica. Ademais, os *softwares* desenvolvidos para o armazenamento e envio dos dados para a Internet atenderam as necessidades do projeto.

RIBEIRO (2017) projetou e desenvolveu um programa supervisório para monitoramento da geração de energia elétrica fotovoltaica entre dois sistemas distintos e independentes, sendo esse composto por painéis solares com características diferentes. Fora também desenvolvido um sistema de aquisição de dados com a função de interfacear a geração dos painéis com o supervisório. O trabalho teve como objetivo precípua o desenvolvimento de um supervisório de baixo custo para a comparação da eficiência entre um painel de Silício

Monocristalino e um painel de Silício Policristalino. Segundo RIBEIRO, o sistema supervisório atendeu às necessidades desejadas, de forma integral e satisfatória, e os erros de leitura gerados não comprometeram o resultado final, uma vez que eles são desprezíveis e podem ser ajustados posteriormente.

CÂNDIDO (2010) em sua dissertação de Mestrado analisou e implementou um sistema fotovoltaico autônomo baseado no conceito de topologia descentralizada *muti-string* e, teve como objetivo principal assegurar o balanço de energia de um sistema fotovoltaico, apresentando malhas de controle independentes para cada conversor e por meio de um sistema supervisório, transmitir informações sobre o estado do barramento CC e banco de baterias ao usuário. Além disso, foi definido qual modo de operação deveria ficar ativo, maximizando a potência extraída dos arranjos e aumentando a vida útil dos bancos de baterias, garantindo, assim, um melhor fornecimento de energia às cargas.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo descreverá o local da pesquisa os procedimentos técnicos e os componentes utilizados para a execução e obtenção das variáveis utilizadas na implementação do dispositivo, assim como o detalhamento das estratégias tomadas ao longo deste trabalho.

3.1 Metodologia da Pesquisa

A metodologia empregada na realização deste trabalho baseia-se no projeto e desenvolvimento de um dispositivo para monitoramento e aquisição de dados de um painel fotovoltaico, além de monitorar a incidência de irradiância solar sobre a superfície das células por meio de um classificador *fuzzy*. Por meio de um ambiente gráfico simples e intuitivo, procura-se demonstrar o quão importante se faz o uso de um sistema supervisorio em centrais fotovoltaicas.

O presente trabalho foi realizado em três etapas. A primeira etapa refere-se ao levantamento bibliográfico, que por sua vez pode ser dividido em três subetapas, sendo elas: o levantamento bibliográfico referente à energia solar fotovoltaica e o cenário atual; aos sistemas supervisorios com ênfase em *Internet of Things (IoT)* e por fim, à lógica *fuzzy*. A partir desse levantamento foi possível desenvolver a segunda etapa do trabalho, referente à montagem do projeto. Em primeiro lugar foi analisado qual tipo de microcontrolador e quais tipos de sensores a serem utilizados. Uma vez definidos tais componentes para a leitura e fornecimento dos dados, foi desenvolvido o sistema para aquisição de tais dados. Além disso, foi desenvolvido o servidor para a comunicação *wifi* entre a placa *wemos atmega2560* e supervisorio, e por fim, o ambiente gráfico para a interação homem-máquina. A última etapa do projeto foi a realização de testes em campo e análise dos dados.

3.2 Local da Pesquisa

A pesquisa fora desenvolvida na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Campus Leste, localizada na cidade de Mossoró-RN, em um sistema fotovoltaico situado por trás do Centro Integrado de Inovação Tecnológica do Semi-Árido (CITED). Ressalta-se, que, a cidade de Mossoró possui altos índices de irradiância solar durante todo o ano, o que favorece, assim, o desempenho dos sistemas fotovoltaicos na região e o incentivo a pesquisas e investimentos no setor.

Por motivos de segurança do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de 3.5kWp, localizado por trás do CITED, o projeto foi desenvolvido e analisado utilizando-se apenas de um único painel fotovoltaico, uma vez que, o que se aplica a um painel pode ser reaplicado aos demais. A Figura 21 ilustra o funcionamento do sistema, o qual é dividido em um Painel Fotovoltaico (1), um dispositivo para aquisição dos dados (2) e um Sensor de irradiância solar (3).

Figura 19: Local da Pesquisa



Fonte: Autoria Própria

O Painel Fotovoltaico (1) utilizado neste trabalho é o modelo STP020S-12/Cb da fabricante Suntech. As características elétricas do módulo estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1: Características do Painel Fotovoltaico

Potência Máxima ($P_{m\acute{a}x}$)	20 Wp
Corrente na Potência Máxima (I_{mp})	1,19 A
Tensão na Potência Máxima (V_{mp})	16,8 V
Corrente de Curto Circuito (I_{cc})	1,21 A
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	21,4 V
Temperatura nominal de operação	+/- 48°C
Rendimento	10%

Fonte: Autoria Própria

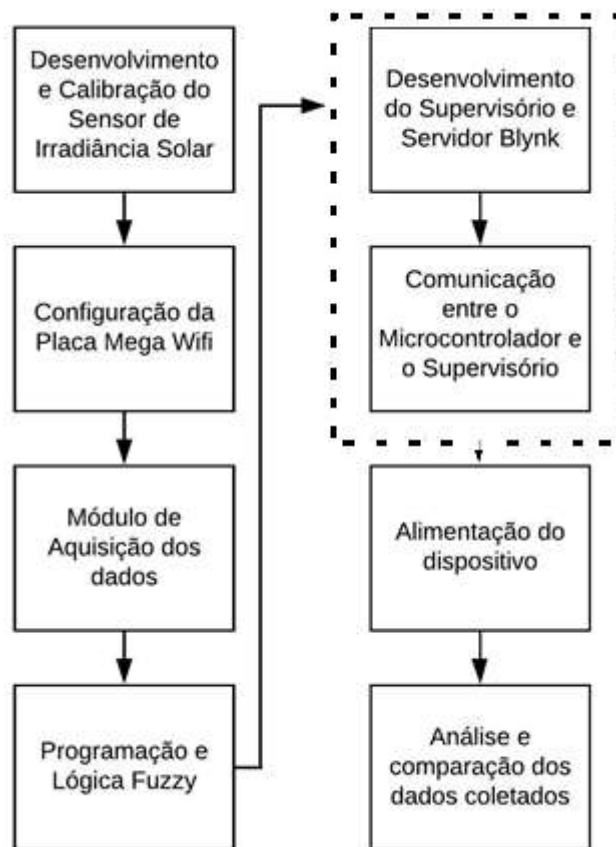
O controlador (2) e o sensor (3) serão abordados em tópicos específicos, devido à importância deles no projeto, como os detalhes tanto da configuração do classificador quanto da construção do sensor.

Por fim, o clima do município é classificado como seco, com altas temperaturas ao longo do ano e curtos períodos de chuva, apresentando, assim, uma temperatura anual média de aproximadamente 28°C. O período diurno, com destaque para o intervalo das 10h às 14h, apresenta os mais altos índices de temperatura e irradiância solar (SARAIVA, 2017).

3.3 Procedimentos da Pesquisa

A montagem do projeto proposto foi dividida em 6 (seis) partes, a fim de se obter uma visão mais detalhada de cada etapa e, por conseguinte uma melhor organização e otimização. Tais etapas serão descritas ao decorrer desse tópico. A Figura 22 mostra o fluxograma para a elaboração deste projeto.

Figura 20: Procedimentos da pesquisa

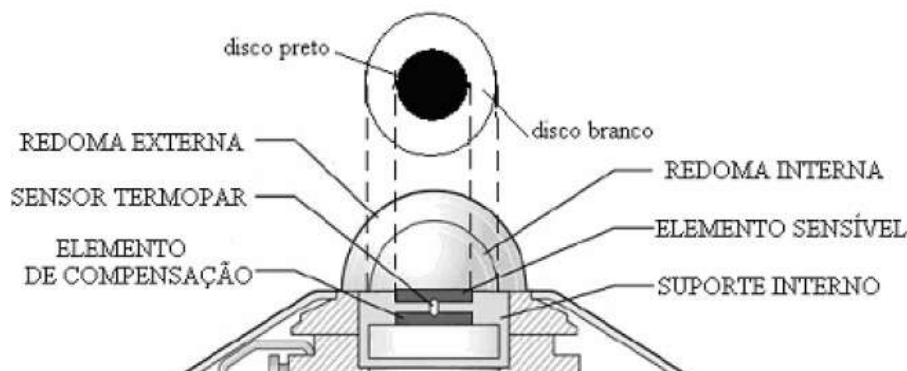


Fonte: Autoria Própria

3.3.1 Desenvolvimento e Calibração de um Sensor de Irradiância Solar

De fato, dispositivos de grau industrial para medir irradiância solar são sensíveis e caros. O piranômetro consiste basicamente em uma placa plana – que é coberta por uma cúpula transparente – revestida por uma superfície extremamente absorvente. Quando o sol bate, a superfície se aquece. A temperatura gerada na superfície é medida por meio de uma termopilha, também conhecida como termopar, que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, uma pintada de preto e outra pintada de branco igualmente iluminadas, fornecendo uma voltagem de saída relacionada à quantidade de irradiância solar que atinge a superfície, ver Figura 23.

Figura 21: Esboço de um piranômetro



Fonte: FREIRE, 2008

Em contrapartida, um outro meio de se coletar medidas solarimétricas é utilizando células fotovoltaicas. Estes piranômetros são largamente utilizados pois apresentam custos bem inferiores em relação aos modelos tradicionais. ZANESCO (1991) em sua tese de Mestrado analisou e desenvolveu um piranômetro fotovoltaico utilizando como base uma célula fotovoltaica. DE PAULA et al (2018) realizaram a confecção e análise de um piranômetro de baixo custo utilizando como componente uma célula fotovoltaica.

Entretanto, devido as características da célula fotovoltaica, este modelo apresenta certas limitações, assim como, uma baixa precisão. Embora não seja de qualidade laboratorial, acredita-se ser suficiente para medições comparativas e fins educacionais.

Considerando-se, assim, o baixo custo de uma célula fotovoltaica, tal componente será a base para a elaboração de um medidor de irradiância solar. Ademais, o primeiro aspecto a ser observado é a corrente de curto-circuito (I_{CC}) gerada pela célula. Para isso, se fez necessário soldar um fio (mais curto possível) entre as extremidades positiva e negativa da célula, ver

Figura 24. Essa é a corrente ideal, tal qual será tida como indispensável para o dimensionamento dos resistores posteriormente. Tal corrente varia linearmente de acordo com o índice de irradiância solar que atinge a superfície da célula. O que pode se tornar um ponto crítico na calibração do sensor, uma vez que, o ideal seria realizar tal calibração no período do ano em que tivéssemos o valor máximo teórico de irradiância solar. Não obstante – nem sempre o ideal é atingível – no decorrer da construção será possível calibrar o sensor por meio de linguagem de programação e/ou mudanças nos resistores.

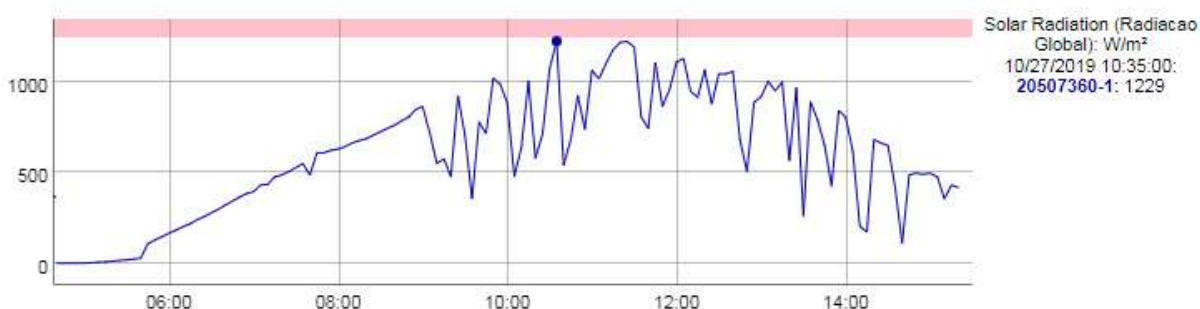
Figura 22: Teste para obtenção da Corrente de curto-circuito (I_{cc})



Fonte: Autoria Própria

Assim sendo, num dia de sol e céu limpo e, com recurso de um multímetro digital de boa qualidade, foram realizadas aferições na célula fotovoltaica. O objetivo é fazer com que o índice de irradiância solar – mais conhecida como luz solar ou radiação solar – ofereça uma leitura de 140mVolt no medidor digital, criando, dessa forma, uma relação de 1mVolt para cada 10W/m². Uma vez que, para latitudes presentes na cidade de Mossoró-RN, nas quais o índice de irradiância solar ultrapassa os 1200W/m² (dados retirados da estação meteorológica situada na usina solar fotovoltaica da UFERSA), se faz necessário que a capacidade de leitura do equipamento não esteja limitada a valores próximos a 1200W/m², tanto por causa da margem de erro do sensor quanto pelo fato de que alguns dias poderão ultrapassar este valor, como pode ser visto na Figura 25.

Figura 23: Representação de um dia de irradiância solar acima do normal



Fonte: Estação Meteorológica da UFERSA

Para tanto, será calculado a resistência shunt, de modo que a tensão de saída na célula não ultrapasse 140mVolt. Com base na máxima corrente de curto-circuito (I_{CC}) fornecida pela célula, 25mA, foi possível dimensionar a resistência shunt através da lei de Ohm ($R=V/I$). Com isso, é encontrado uma resistência de 5,6ohms, sendo difícil achar no mercado uma resistência com este exato valor. Para sanar tal problema, foi utilizado duas resistências em série, sendo uma de 4.6ohms e outra de 1ohms, obtendo-se, assim, uma resistência de 5,6ohms.

Depois de dimensionado a resistência de acordo com a corrente de curto-circuito, essa foi soldada entre os polos positivo e negativo da célula fotovoltaico e em seguida levada a campo para realizar os devidos testes, como mostra a Figura 26. Tais testes consistiram em analisar a tensão de saída do sensor em diversas condições climáticas, de modo a observar a variação desse sensor ao longo do dia.

Vale ressaltar que, mesmo com todos os cálculos realizados os resultados obtidos em campos é diferente dos obtidos na teoria, uma vez que em campo estamos expostos a diversos intemperes que não é possível ser calculados. No entanto, tais fatores que influenciaram os resultados em campo podem ser contornados na programação do sensor.

Figura 24: Testes com a célula fotovoltaica

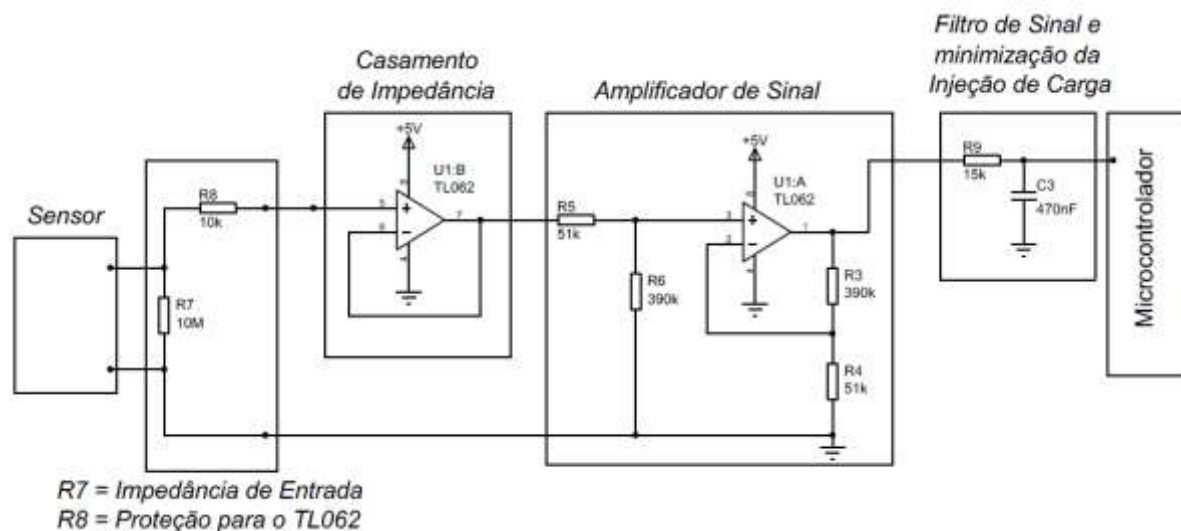


Fonte: Autoria Própria

Por fim, é realizado a leitura da variação da tensão na saída do sensor de irradiância solar e a conversão desse para a unidade de W/m^2 . Apesar de existirem diversas maneiras de se ler e apresentar os dados, como por exemplo, os datalogger, o presente trabalho utilizará uma placa *wemos atmega2560 wifi* valendo-se de um dos seus conversores analógico digital (ADC) e a plataforma Arduino IDE, bem como de um Amplificador Operacional (TL062) para

linearizar o sinal fornecido pela célula fotovoltaica, como é visto na Figura 27 e no Apêndice 1. Além disso, o circuito condicionador de sinais além de linearizar o sinal do sensor, tem como objetivo diminuir ruídos gerados na porta analógica da placa.

Figura 25: Circuito condicionador de sinal para linearização do sinal

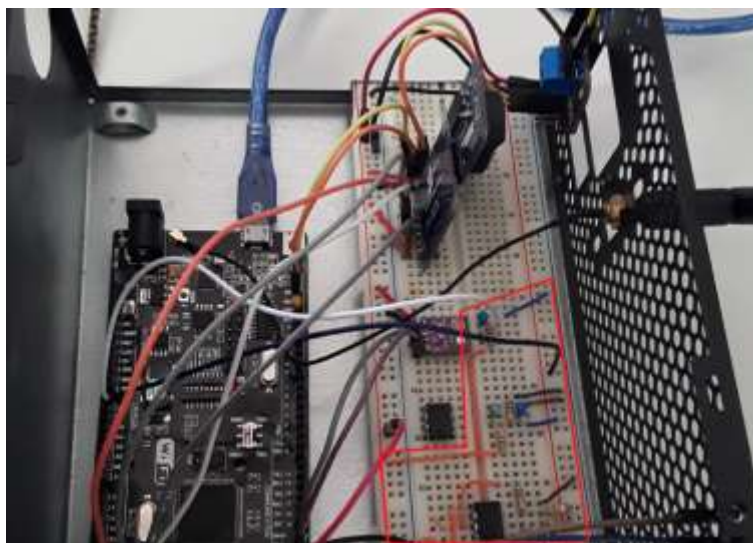


Fonte: Autoria Própria

O circuito integrado TL062 trata-se de um duplo amplificador operacional com entrada J-Fet o que lhe dá uma alta impedância de entrada, ideal para amplificar pequenos sinais. Possui ainda uma alta precisão, além de ter a possibilidade de ser alimentado por uma única fonte de alimentação de 5 V a 18 V, não necessitando, dessa forma, de uma fonte de alimentação externa para o circuito integrado. Esse AmpOp é bastante utilizado em instrumentos musicais, o qual necessita aumentar o ganho do sistema. Mais informações sobre esse amplificador operacional podem ser vistas no Anexo 1.

A Figura 28 ilustra a montagem do circuito condicionador de sinal utilizando um amplificador operacional TL062 para linearização do sinal. A área marcada de vermelho representa o circuito condicionador de sinais, o qual recebe o sinal do sensor fotovoltaico e, por meio do circuito, estabiliza o sinal na entrada analógica A0 do microcontrolador.

Figura 26: Montagem do circuito condicionador de sinal



Fonte: Autoria Própria

A calibração do sensor fora realizada baseando-se na estação meteorológica situada na usina solar fotovoltaica da UFERSA. Como o objetivo do trabalho não é calibrar um sensor piranômetro e sim observar a variação da irradiância solar ao longo do dia, o erro presente entre a estação meteorológica e o sensor fotovoltaico não irá influenciar na análise dos dados.

O código do sensor de irradiância solar, que pode ser visto de forma completa no Apêndice 2, permite que se escolha a tensão de referência do conversor ADC ATmega2560, entre o valor “*default*” (5V do AVCC) e o valor “*internal1v1*” (1.1V do AREF), ajustando as conversões e cálculos automaticamente conforme a referência selecionada.

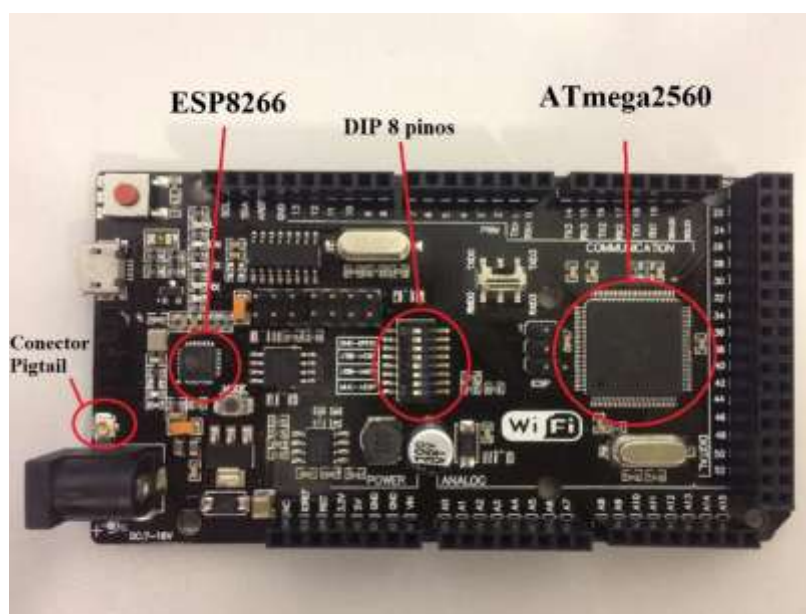
Além disso, é feita a compensação automática conforme a tensão de referência usada na polarização do amplificador do condicionador de sinal, impedindo, dessa forma, erros provenientes de eventuais flutuações na alimentação, seja devido a tolerância de componentes eletrônicos ou variações nos valores desses componentes devido a intempéries ou envelhecimento.

Por fim, a rotina para o cálculo do índice de irradiância solar foi realizada a partir de um número x de amostras, que pode ser alterado de acordo com os resultados obtidos na célula fotovoltaica. A rotina também garante que sejam amenizados os ruídos espúrios que poderiam resultar em valores negativos, se o sinal estiver muito próximo ao extremo inferior da escala, isto é, próximo ao zero da escala.

3.3.2 Configuração Placa wemos atmega2560 wifi

Neste tópico serão abordadas as características e funcionalidades da versão customizada da placa *wemos atmega2560 wifi*, bem como sua comunicação por meio de um CI-ESP8266 acoplado. A placa dispõe de um controlador ATmega2560 descolado à direita e um controlador ESP8266 localizado na lateral esquerda, ver Figura 28. O conector USB tipo B foi substituído por um conector micro usb. A comunicação serial é realizada através do conversor CH340G USB-TTL e um comutador *dip switch* de 8 pinos. A Figura 29 ilustra a placa utilizada no projeto.

Figura 27: Placa wemos Atmega2560 wifi



Fonte: Autoria Própria

O principal motivo que levou a escolha dessa placa foi que ela possui 32MB (megabits) de memória flash, comparado ao Arduino UNO e Arduino Mega que possuem apenas 32 e 256KB de memória respectivamente, tornando inviável o uso para determinados projetos, além de possuir um conversor CH340G USB-TTL e um ESP-8266 acoplado, para transmissão dos dados via *wifi*, todos os componentes podem ser configurados para funcionar em conjunto ou de forma independente. O modo de operação é selecionado por meio da chave *dip switch* de 8 pinos. Uma característica importante dessa placa é o conector Pigtail. A importância deste conector se dá pelo fato de que uma vez conectado uma antena *wifi* ao conector Pigtail o alcance dos dados passa de aproximadamente 90 metros em linha reta para aproximadamente 250 metros. No entanto, a principal desvantagem dessa placa é seu tamanho que, dependendo do

projeto, pode ser um entrave. No caso deste trabalho não se fez necessário o uso de uma estrutura compacta, o que não acarretou problemas em sua construção. Os seis modos de operação, da placa estão representados na Tabela 2.

Tabela 2: Modos de operação da placa wemos Atmega 2560 *wifi*

	1	2	3	4	5	6	7	8	RX/TX
USB Isolado	—	—	—	—	—	—	—	—	0
USB <-> ATmega2560	—	—	ON	ON	—	—	—	—	0
USB <-> ESP8266 (firmware)	—	—	—	—	ON	ON	ON	—	0
USB <-> ESP8266 (work)	—	—	—	—	ON	ON	—	—	0
ATmega2560 <-> ESP8266	ON	ON	—	—	—	—	—	—	0
USB <-> ATmega2560 <-> ESP8266	ON	ON	ON	ON	—	—	—	—	3

Fonte: Autoria Própria

3.3.3 Módulo de aquisição de dados

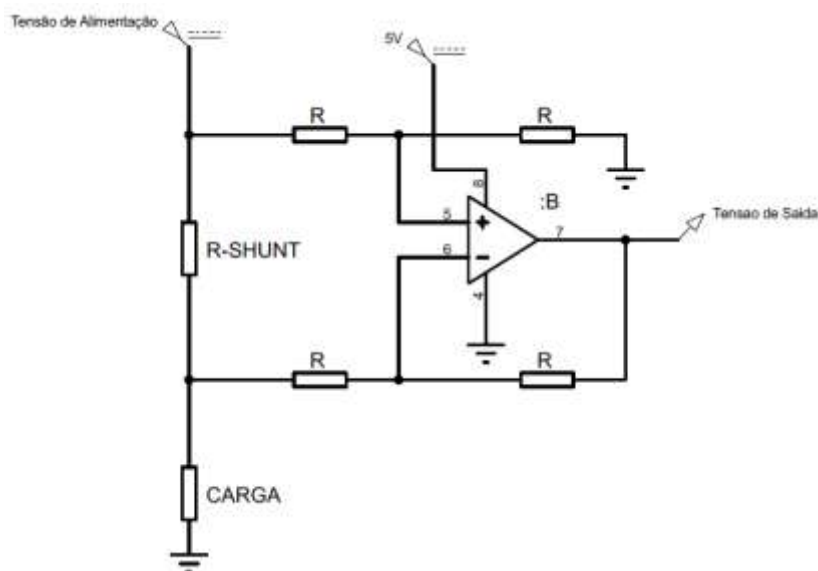
A aquisição dos dados será feita por meio da placa wemos atmega2560 *wifi* em conjunto com um módulo microSD e um módulo RTC (*Real Time Clock*), no qual serão compostos por um sensor INA 219 que realizará medições de grandezas como tensão, corrente, potência e consumo, esse módulo será composto, também, por um sensor BME 280 que mede temperatura, umidade, altitude e pressão atmosférica. Um sensor infravermelho MLX 90614 de alta precisão para a medição da temperatura na superfície do painel também será utilizado. O Anexo 2, 3 e 4 referem-se aos devidos sensores, respectivamente. E por fim, será utilizado o sensor de irradiância solar, desenvolvido e calibrado neste trabalho, para medições do índice de irradiância solar no painel fotovoltaico.

3.3.3.1 Sensor INA 219

O sensor utilizado neste projeto para as medições das grandezas elétricas foi o INA 219 da *texas instruments*, sensor esse bastante versátil para o monitoramento de tensão e corrente CC. Possui em sua composição um conversor ADC interno de 12 bit e interface I2C para comunicação. Permitindo, assim, uma alta precisão em suas medições. O método de medição

de corrente utilizado foi o *high-side*, ver Figura 30, no qual o resistor *shunt* é colocado entre a fonte de alimentação e a carga. Tal método permite que o dispositivo meça tanto a corrente quanto a tensão na carga.

Figura 28: Método de medição *High-side*



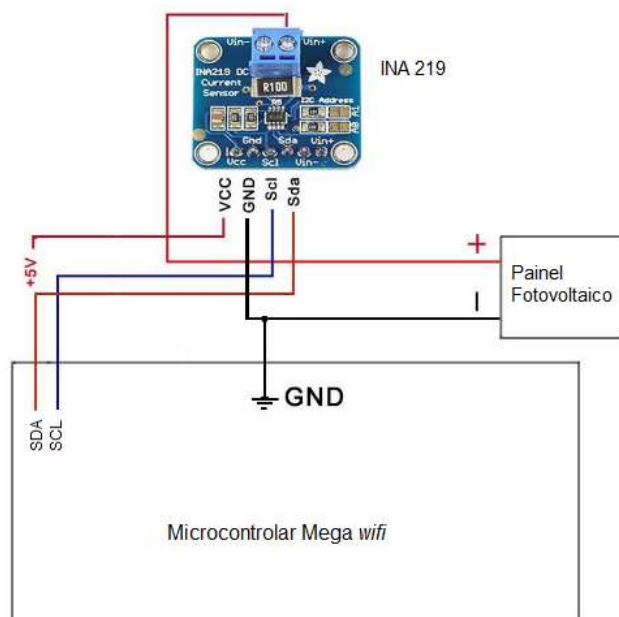
Fonte: Autoria Própria

Por conseguinte, quando uma corrente elétrica atravessa a resistência *shunt* surge, assim, em seus terminais uma diferença de potencial (ddp), essa tensão que surge é proporcional a corrente que circula através da resistência. Por meio da Lei de Ohms ($V=R/I$) pode-se obter, de forma simples, a tensão e a corrente no sistema.

A integração do módulo INA 219 ao microcontrolador Mega *wifi* é realizada através dos terminais Vcc e Gnd, podendo variar de 3 V a 5,5 Vcc, ou seja, esse módulo funciona em praticamente todos os microcontroladores existentes no mercado atualmente. Os pinos SDA e SCL são referentes a comunicação I2C, e devem ser conectados nas portas respectivas de cada microcontrolador. No caso do microcontrolador Mega *wifi*, esse possui 2 (duas) entradas SDA e SCL para comunicação I2C.

Por fim, vale ressaltar que o pino Gnd do módulo INA 219 deve ser conectado ao Gnd da carga que está sendo analisada, por exemplo, ao monitorar a geração de um painel fotovoltaico (ou de uma carga qualquer) o negativo do painel deve ser conectado junto ao Gnd do módulo e ambos conectados ao Gnd do microcontrolador. A Figura 31 ilustra de forma detalhada essa montagem.

Figura 29: Ligação do sensor INA219



Fonte: Autoria Própria

3.3.3.2 Sensor BME280

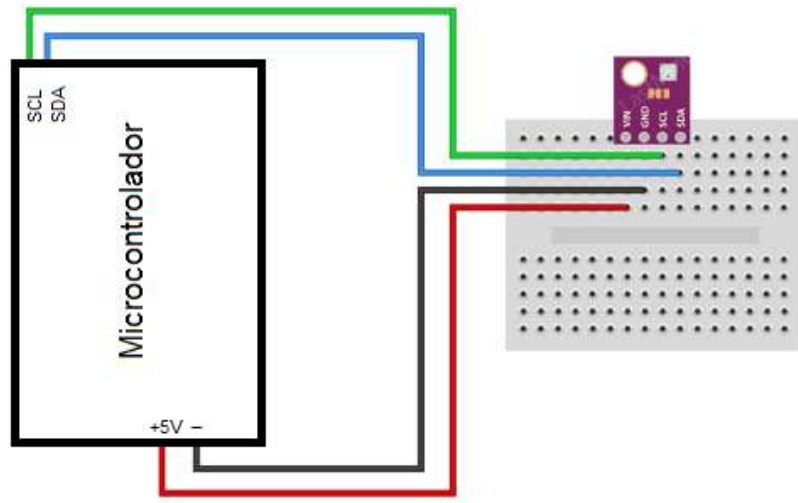
Também conhecido como barômetro digital o módulo possui um sensor fabricado pela Bosch – BME280. Esse módulo é capaz de realizar medições de pressão atmosférica, umidade, altitude e temperatura. É um módulo de alta capacidade e resolução, sendo utilizado nas mais diversas aplicações como, estações meteorológicas e aperfeiçoamento de navegação GPS. Esse módulo combina 4 (quatro) sensores individuais de alta linearidade e alta precisão, projetado para projetos que necessitam de um baixo consumo, estabilidade a longo prazo e alta robustez.

O sensor de umidade possui um tempo de resposta extremamente rápido, suportando, dessa forma, os requisitos de desempenho para aplicações emergentes, como reconhecimento de contexto e alta precisão em uma ampla faixa de temperatura. O sensor de temperatura integrado foi otimizado para filtrar ruídos muito baixo, possuindo uma alta resolução. Tal sensor, além de ser usado para compensação da temperatura dos sensores de pressão e umidade, pode ser usado para estimar a temperatura ambiente. Mais informações sobre o módulo podem ser vistas no Anexo 3.

A escolha pelo módulo BME280 se deu pelo fato desse possuir o padrão de conexão I2C, aumentando, assim, sua praticidade de utilização. Além de possuir uma alta resolução, o

que contribui em uma maior precisão na obtenção dos resultados. A Figura 32 ilustra a ligação do sensor BME 280 ao microcontrolador.

Figura 30: Ligação do sensor BME 280

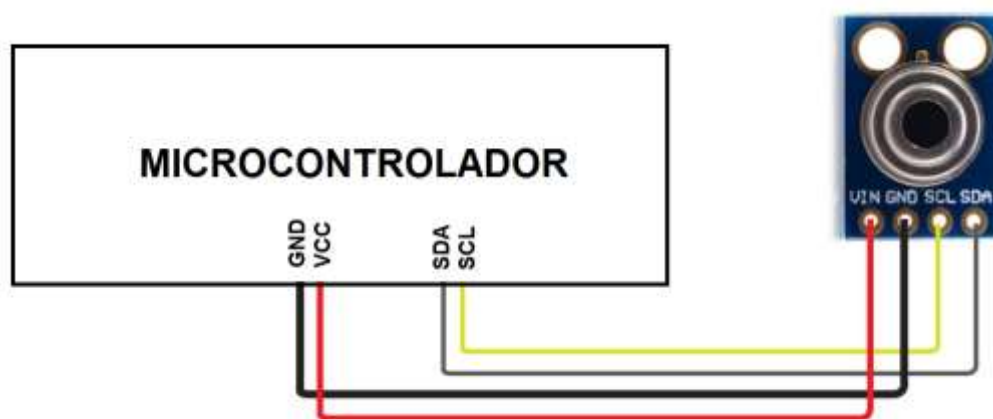


Fonte: Autoria Própria

3.3.3.3 Sensor MLX 90614

Durante o processo de montagem do dispositivo foi adicionado, ainda, um sensor infravermelho que permite a medição de temperaturas de objetos sem a necessidade de contato, eliminando, assim, qualquer contaminação nas leituras. Dessa forma, foi utilizado um sensor MLX90614 da fabricante *Melexis*, conforme ilustra a Figura 33.

Figura 31: Sensor de temperatura infravermelho mlx90614



Fonte: Autoria Própria

Tal sensor possui em seu encapsulamento um circuito condicionador de sinal, além de um amplificador de baixo ruído e um ADC de 17bits, aumentando, assim, sua precisão nas leituras. Este sensor utiliza, ainda, o protocolo de comunicação I2C para comunicar-se com a placa *wemos* que irá receber as medidas de temperatura. Um dos principais recursos deste sensor é a capacidade de poder reconfigurar seu endereço, podendo adicionar até 127 sensores ao mesmo barramento. Além disso, este sensor possui uma resolução máxima de até 0,02°C, conseguindo realizar leituras de temperatura de objetos desde os -70 até os 382,2°C e leituras de temperatura ambiente na gama dos -40 aos 125°C.

Esse sensor foi montado de forma direcional ao painel fotovoltaico, conforme ilustra a Figura 34, permitindo, dessa forma, que o sensor realize leituras do centro do painel.

Figura 32: Instalação do sensor de temperatura infravermelho



Fonte: Autoria Própria

3.3.3.4 Datalogger

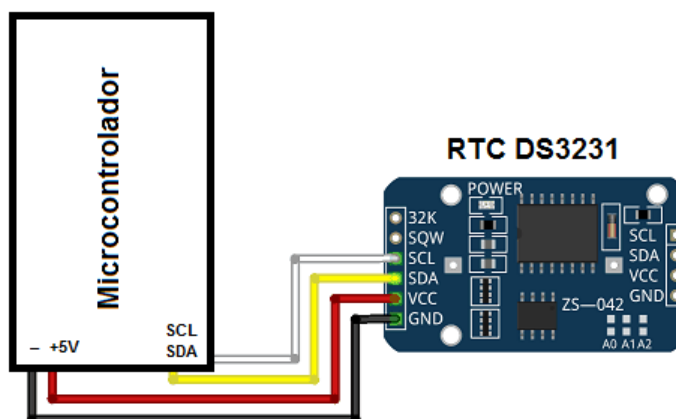
Ao armazenar dados de sensores é de suma importância que todas as informações que serão coletadas e armazenadas indiquem a data e o horário em que foram realizadas as leituras. Nesse caso, será utilizado na montagem do *datalogger* um módulo RTC (*Real Time Clock*) e um módulo microSD.

O módulo adotado neste projeto foi o DS3231 da fabricante *Maxim Integrated*. Esse módulo possui além de um sensor de temperatura, um oscilador para melhor exatidão e utiliza o protocolo de comunicação I2C, sendo o pino SCL para o *clock* e o pino SDA para os dados. Tal módulo fornece informações dos segundos, minutos, horas, dias, meses e ano, no formato

BCD (acrônimo da expressão inglesa *binary coded decimal*), além de apresentar um baixo consumo de energia e capacidade de reconhecer os meses com menos de 31 dias, inclusive anos bissextos.

Esse módulo possui ainda um sensor interno que detecta uma possível falha na alimentação principal e, de forma automática, passa a ser alimentado pela bateria de 3,5V que é acoplada em sua estrutura. Essa bateria garante o funcionamento do RTC na ausência da alimentação principal, sem perder, assim, sua configuração. A Figura 35 ilustra a montagem do módulo DS3231 em um microcontrolador.

Figura 33: Montagem do módulo RTC DS3231



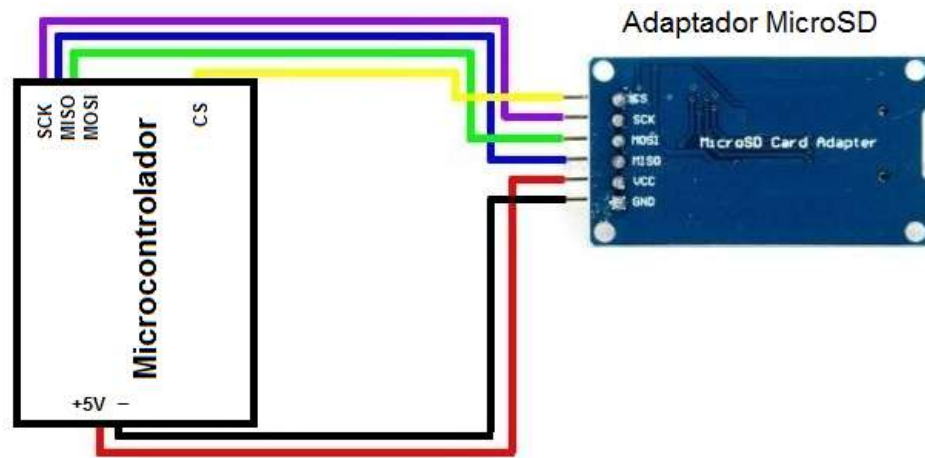
Fonte: Autoria Própria

Uma vez informado a data e a hora que foi realizada determinada leitura se faz necessário armazenar esses dados em algum tipo de memória. A memória é a capacidade de reter, armazenar e recuperar informações disponíveis. Dessa forma, pode-se afirmar que a memória é uma das partes mais importantes de um *datalogger*.

Neste projeto foi utilizado o módulo adaptador microSD da fabricante *Catalex*, ver Figura 36. Esse módulo possui uma entrada para cartões do tipo Micro SD e, utiliza como meio de comunicação o protocolo SPI usado para ler e escrever dados na memória *flash* do cartão. Os dados dos sensores serão armazenados a cada minuto.

Para o armazenamento das informações foi utilizado um cartão micro sd de 4gb da fabricante *SanDisk*. Tal cartão tem capacidade para armazenar os dados coletados deste projeto durante aproximadamente 22 anos.

Figura 34: Montagem do módulo microSD



Fonte: Autoria Própria

3.3.4 Programação e Lógica Fuzzy

A programação foi desenvolvida por meio de linguagem de programação de alto nível, no caso em contexto a linguagem de programação utilizada no microcontrolador foi a linguagem denominada *Processing*, baseada em C – com pequenas modificações – a qual é uma linguagem bastante tradicional e de fácil entendimento. Além disso, a programação foi desenvolvida utilizando a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino IDE (*Integrated Development Environment*), ver Figura 37. Tal plataforma permite a instalação das bibliotecas necessárias para o funcionamento dos sensores, bem como a conversão da programação em linguagem de máquina (compilação).

Figura 35: Ambiente de programação - IDE



Fonte: Autoria Própria

De acordo com Cunha (2017), em sua dissertação de mestrado, embora o Arduino Mega2560 seja um dos mais simples dentre os modelos da plataforma, a sua pouca memória (256KB) acaba tornando um dos principais empecilhos na utilização desse microcontrolador em projetos mais complexos. No entanto, conforme mencionado anteriormente, o projeto utilizará uma placa wemos mega2560 *wifi*, de forma a contornar esse problema, valendo-se de uma memória de 32MB, como ilustra a Tabela 7.

Tabela 3: Comparação entre microcontroladores

Arduino	Processador	Operação	CPU	Portas Analóg	Portas Digitais	EEPROM	SRA M	Flash	USB	UART
UNO	ATmega328P	5V/7-12V	16 MHz	6	14/6	1kb	2kb	32kb	Regular	1
Mega2560	ATmega2560	5V/7-12V	16MHz	16	54/15	4kb	8kb	256kb	Regular	4
Wemos	ATmega2560 ESP-8266	5V/7-12V 3V	16MHz 80MHz	16 1	54/15	4kb	8kb 64kb	32Mb 8Mb	CH340 G	4 1/wifi

Fonte: Autoria Própria

3.3.4.1 Lógica Fuzzy e biblioteca eFLL

A lógica *fuzzy* foi desenvolvida com o intuito de classificar o índice de irradiância solar sobre a superfície de um painel fotovoltaico. Nesse sentido, a lógica *fuzzy* é formada por 4 (quatro) etapas: processamento da entrada que realiza a *fuzzificação* dos dados de entrada, base

de regras, base de inferência que realiza as tomadas de decisões e processamento da saída que fornece um valor discreto na saída.

O sistema *fuzzy* possui duas entradas: o erro e a derivada do erro (variação instantânea do erro), e na saída possui a derivada do sinal. Em síntese, a lógica *fuzzy* faz uma busca do valor ideal do sistema para aplicar na planta, tendo como base de referência o erro e a variação do erro do sistema. O método de inferência utilizado nesta lógica foi o Mamdani e as funções de pertinência utilizadas para o erro e a variação do erro foram trapezoidais.

Além disso, o uso da biblioteca eFLL (*Embedded Fuzzy Logic Library*), neste projeto, foi de suma importância tanto no quesito agilidade quanto no quesito praticidade. A biblioteca foi desenvolvida pelo grupo de robótica RRG (*Robotic Research Group*) na Universidade Estadual do Piauí (UESPI – Teresina). Tal biblioteca tem como principal objetivo simplificar a implementação de um controlador *fuzzy*, mantendo um código intuitivo e de fácil compreensão. Suas principais estruturas são:

- *Fuzzy*: Consiste na classe principal. Engloba todo o sistema *fuzzy*. Por meio desse, é possível manipular os conjuntos *fuzzy*, as variáveis linguísticas, entradas e saídas.
- *FuzzySet*: Permite a modelagem de cada conjunto *fuzzy* do sistema. A biblioteca eFLL, atualmente, suporta as funções de pertinência triangular, trapezoidal e singleton. Embora o autor mencione que a biblioteca suporte 3 (três) funções de pertinência, só foi possível realizar a lógica *fuzzy* por meio da função trapezoidal.
- *FuzzyInput*: Agrupa os conjuntos *fuzzy* de entrada que pertencem ao mesmo domínio.
- *FuzzyOutput*: Equivale à função anterior, porém para as variáveis de saída.
- *FuzzyRule*: Consiste na base de regras do objeto *fuzzy*, contendo um ou mais deste.
- *FuzzyRuleAntecedent*: Tal função é usada para compor o objeto *FuzzyRule*. Consiste em montar a parte condicional (se/ou) das regras.
- *FuzzyRuleConsequent*: Usado, também, para compor o objeto *FuzzyRule*. É responsável por montar a parte consequencial (então) das regras.

O uso da biblioteca eFLL se resume, praticamente, em 5 (cinco) procedimento principais: criação e associação dos conjuntos *fuzzy* às entradas e saídas, criação e associação das regras às entradas e saídas, execução da codificação a partir dos dados de entrada, obtenção da saída a partir da decodificação (CUNHA, 2017).

3.3.4.2 Estrutura da programação

Buscando uma melhor compreensão dos leitores e praticidade do desenvolvedor, a programação fora dividida em pequenos trechos, isolados, e posteriormente agrupados em um único arquivo, de forma a facilitar tanto a implementação quanto a sua compreensão. Cada trecho citado a seguir corresponderá a uma rotina específica do programa.

Em primeiro lugar, são declaradas as bibliotecas, que são a parte inicial da programação. Tais bibliotecas tem como objetivo simplificar a programação, adicionando as rotinas e funções dos sensores, bem como de supervisórios e bancos de dados. Necessitando, dessa forma, apenas declarar sua respectiva biblioteca, como ilustra a Figura 38.

Figura 36: Declaração das bibliotecas

```

1 //=====BLYNK=====
2 #define BLYNK_PRINT Serial
3 #include <ESP8266_Lib.h>
4 #include <BlynkSimpleShieldEsp8266.h>
5 //=====
6 //=====Sleep Mode=====
7 #include "LowPower.h" // Biblioteca para economia de bateria
8 //=====
9 //=====Infravermelho=====
10 #include <Adafruit_MLX90614.h>
11 Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();
12 //=====
13 //=====SdCard=====
14 #include <Wire.h>
15 #include <SD.h> // sdcard
16 #include <SPI.h> // sdcard
17 Sd2Card SDcard;
18 SdVolume volume;
19 const int chipSelect = 48; //SdCard
20 //=====
21 //=====RTC=====
22 #include <DS3231.h>
23 DS3231 rtc(SDA, SCL);
24 //=====
25 //=====Fuzzy=====
26 #include <Fuzzy.h>
27 Fuzzy *fuzzy = new Fuzzy();
28 //=====

```

Fonte: Autoria Própria

A biblioteca Blynk (linha 2) foi usada com o objetivo de realizar a comunicação entre a placa wemos mega2560 e o supervisório. A biblioteca Sleep Mode (linha 7) tem como característica diminuir o consumo de bateria, a sua rotina consiste em cada *looping* que o sistema faz o microcontrolador “dorme” por 8s, gerando uma redução no consumo da bateria e aumentando a duração dessa. A biblioteca SdCard e RTC (linha 14 e 22, respectivamente) foram usadas para o desenvolvimento do *datalogger* mencionado anteriormente. Já a biblioteca

Fuzzy (linha 26) foi utilizada para o desenvolvimento da lógica *fuzzy*, de forma monitorar a eficiência de um painel fotovoltaico. Por fim, são declaradas as bibliotecas BME 280 e INA 219, responsáveis pelo monitoramento da temperatura e umidade, além da tensão e corrente elétrica, respectivamente.

Em seguida, o código realiza a comunicação entre a placa wemos mega2560 e o supervisor Blynk, essa etapa é primordial para a leitura dos dados via *wifi*. Tal comunicação é feita por meio de alguns passos, conforme ilustra a Figura 39: em primeiro lugar é gerado uma espécie de código de autenticação no supervisor, esse código deve ser anexado a programação (auth); em seguida é feita comunicação com a rede *wifi*, na qual deve ser informado na programação o nome da rede (ssid) a senha (pass) e caso o servidor seja privado, informar o endereço do servidor (server) e por fim a porta de comunicação (port).

Figura 37: Configuração para comunicação entre o microcontrolador e o supervisor Blynk

```

1 //=====WIFI=====
2 char auth[] = "399b4d9eb18642ea981a5a3cc3c3c79f";
3 char ssid[] = "smart_solar";
4 char pass[] = "solar!@#";
5 char server[] = "192.168.2.121"; // IP for your Local Server
6 int port = 8080;
7
8 #define EspSerial Serial3
9 #define ESP8266_BAUD 9600
10 ESP8266 wifi(&EspSerial);
11 //=====

```

Fonte: Autoria Própria

O trecho a seguir tratasse da programação do sensor de irradiância solar, que é uma das principais partes do sistema, uma vez que foi feita de forma bastante minuciosa os ajustes. A entrada analógica (A0) do microcontrolador recebe os valores do sensor (célula fotovoltaica) que passa antes por um circuito condicionador de sinal, de forma a linearizar o sinal em sua saída.

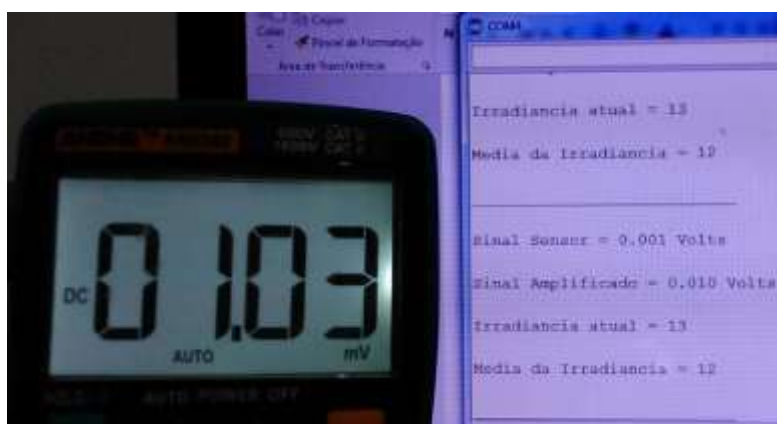
Além disso, o código permite que o operador escolha a tensão de referência do ADC, entre as opções “*default*” (0 a 5V na porta analógica) ou “*internal1v1*” (0 a 1.1V). Dessa forma, ao selecionar a opção “*internal1v1*” a resolução do sensor passa a ser 0,001075 (1.1/1023), sendo assim, mais precisa que a resolução “*default*” que é de 0,004887. Logo, foi utilizado neste sensor a opção “*internal1v1*”.

Foi feita, ainda, a compensação automática conforme o tipo de referência utilizado no sensor, impedindo, assim, que erros provenientes de eventuais variações na tensão (seja por

causa da temperatura, seja por causa de eventuais flutuações na alimentação, seja por causa da tolerância dos componentes eletrônicos ou variações nos valores desses componentes devido a intempéries ou envelhecimento) ocorra.

A Figura 40 ilustra o teste feito por meio de uma fonte de bancada DC setada em 1mV, o intuito deste teste é obter uma saída (irradiância) de 10W/m². Observa-se que o sinal do sensor em milivolts é de 0.001 Volts, conforme foi setada na fonte de bancada. Já o sinal amplificado é de 0.010 Volts, o qual varia até 1.1 Volts ou 5 Volts, de acordo com a referência selecionada. O código ainda fornece a irradiância atual e a sua média. No caso da média é feita uma amostragem com 50 amostras, tornando o sensor mais estável.

Figura 38: Calibração do sensor de irradiância solar



Fonte: Autoria Própria

O próximo trecho da programação consiste no desenvolvimento de uma lógica *fuzzy* para o monitoramento do índice de irradiância solar sobre um painel fotovoltaico, para tanto, fez uso da biblioteca eFLL, que simplifica a implementação do *fuzzy* na IDE Arduino, conforme ilustra Figura 41.

Figura 39: Configuração das variáveis linguísticas

```

32 //=====Fuzzy=====
33 #include <Fuzzy.h>
34 Fuzzy *fuzzy = new Fuzzy();
35
36 //Entradas Irradiância
37 FuzzySet *ib = new FuzzySet(0, 0, 0, 400); // ib-> Irradiância baixa
38 FuzzySet *iqb = new FuzzySet(200, 400, 400, 600); // iqb-> Irradiância quase baixa
39 FuzzySet *im = new FuzzySet(400, 600, 600, 800); // im-> Irradiância média
40 FuzzySet *iga = new FuzzySet(600, 800, 800, 1000); // iga-> Irradiância quase alta
41 FuzzySet *ia = new FuzzySet(800, 1200, 1400, 1400); // ia-> Irradiância alta
42
43 //Entradas Horário
44 FuzzySet *mc = new FuzzySet(530, 530, 530, 730); // mc-> muito cedo
45 FuzzySet *c = new FuzzySet(530, 700, 700, 830); // c-> cedo
46 FuzzySet *qc = new FuzzySet(730, 900, 900, 1130); // qc-> quase cedo
47 FuzzySet *qt = new FuzzySet(930, 1130, 1130, 1330); // qt-> quase tarde
48 FuzzySet *t = new FuzzySet(1130, 1330, 1330, 1530); // t-> tarde
49 FuzzySet *mt = new FuzzySet(1330, 1530, 1730, 1730); // mt-> muito tarde
50
51 //Saída Incidência Solar
52 FuzzySet *eb = new FuzzySet(0, 0, 15, 20); // eb-> Incidência Solar baixa
53 FuzzySet *eqb = new FuzzySet(10, 25, 25, 40); // eqb-> Incidência Solar baixa
54 FuzzySet *em = new FuzzySet(30, 45, 45, 60); // em-> Incidência Solar média
55 FuzzySet *eqa = new FuzzySet(50, 65, 65, 80); // eqa-> Incidência Solar quase alta
56 FuzzySet *ea = new FuzzySet(70, 80, 100, 100); // ea-> Incidência Solar alta
57
58 //=====
59

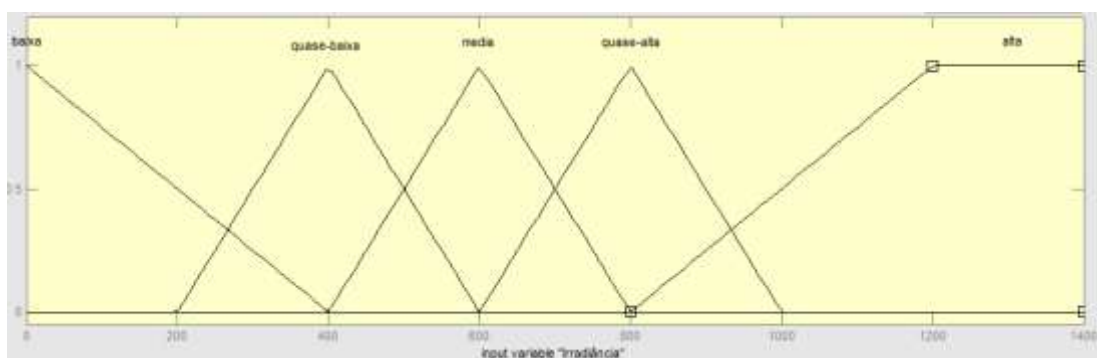
```

Fonte: Autoria Própria

A lógica *fuzzy* foi desenvolvida valendo-se de 2 (duas) entrada sendo elas: Irradiância e Horário. Além disso, a função de pertinência utilizada foi do tipo trapezoidal, o uso dessa função trapezoidal se deu pelo fato do programa acusar erro ao utilizar outro tipo de função, restando, dessa forma, apenas esse tipo de função disponível. Por fim, foram utilizadas 5 (cinco) variáveis linguísticas para a entrada da irradiância, 6 (seis) variáveis linguísticas para o horário e 5 (cinco) variáveis linguísticas para a incidência solar que é a saída do *fuzzy*.

A variável linguística “Irradiância Solar” foi composta por cinco funções de pertinência do tipo trapezoidal, variando de baixa (zero) até alta (1200), conforme ilustra a Figura 42.

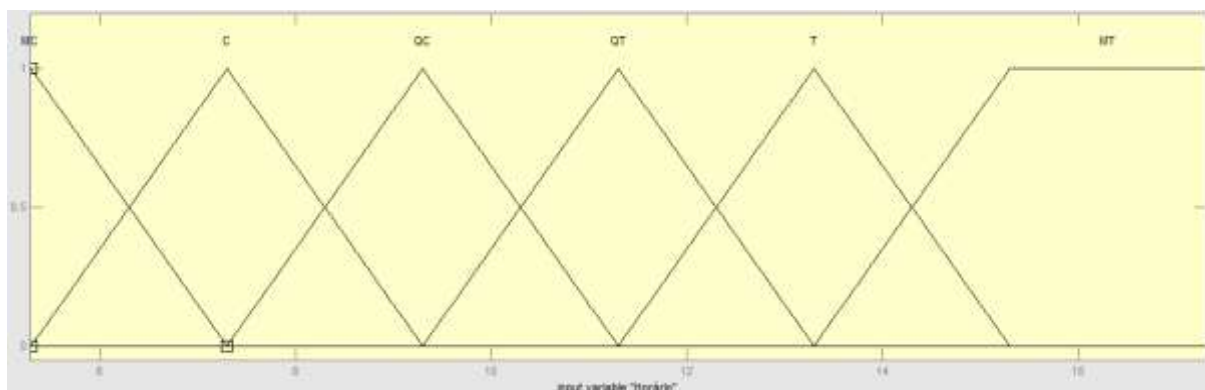
Figura 40: Variável "Irradiância Solar"



Fonte: Autoria Própria

Já a variável linguística “Horário” foi composta por seis funções de pertinência do tipo trapezoidal, variando de muito cedo “mc” (5:30) até muito tarde “mt” (17:30), conforme ilustra a Figura 43.

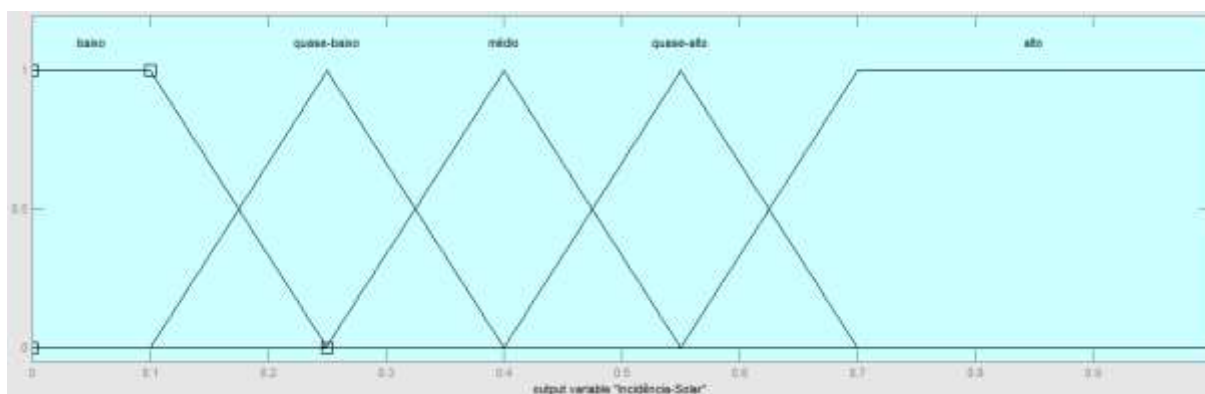
Figura 41: Variável "Horário"



Fonte: Autoria Própria

Por fim, a variável linguística incidência solar foi composta, também, por 5 funções de pertinência do tipo trapezoidal, variando de baixo (zero) até alto (1), conforme ilustra a Figura 44.

Figura 42: Variável "Incidência Solar"



Fonte: Autoria Própria

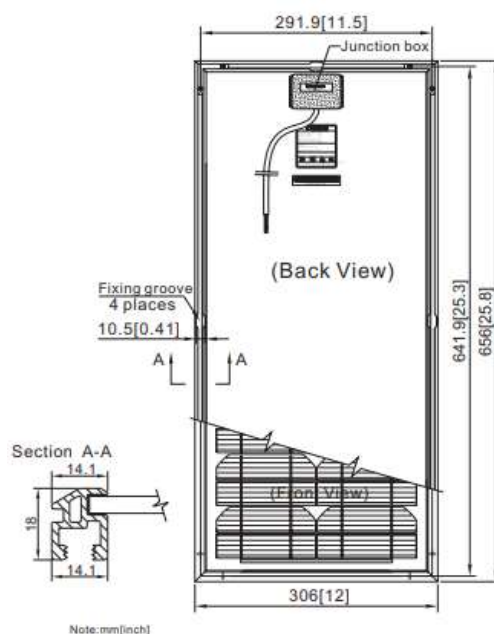
O próximo trecho da programação diz respeito à eficiência do painel fotovoltaico. Tal eficiência informada pelos fabricantes costuma ser padrão, como mencionado no tópico referente a eficiência de um painel fotovoltaico, considerando condições estáveis como, irradiância de 1000W/m^2 e temperatura de 25°C . No entanto, como cada lugar possui condições específicas, tais condições devem mudar, variando, dessa forma, a eficiência dos painéis. Para tanto, o cálculo da eficiência deve ser feito observando alguns fatores:

- Características e desempenho dos diferentes materiais compostos nos painéis;
- Posicionamento e inclinação correta;

- Ocorrência de sombreamentos temporários;
- Temperatura dos painéis (superfície);
- Tamanho dos painéis (área).

Considerando tais informações e a partir dos dados disponibilizados pela fabricante, foi calculado a área total do painel, ver Figura 45, que possui 291.9mm de largura e 641.9mm de altura. A área total calculada foi de aproximadamente 0,200m².

Figura 43: Dimensões do painel fotovoltaico



Fonte: Suntech, 2019

Com base na área total calculada e a partir dos valores de tensão de máxima potência, corrente de máxima potência e irradiância solar, foi possível obter, dessa forma, a eficiência, de fato, gerada pelo painel no local instalado. Para isso, foi utilizado a Equação 1 (pág. 28). O resultado obtido foi dividido por 10 para ficar em porcentagem, como mostra a Figura 46.

Figura 44: Programação para obtenção da eficiência e da potência estimada

```

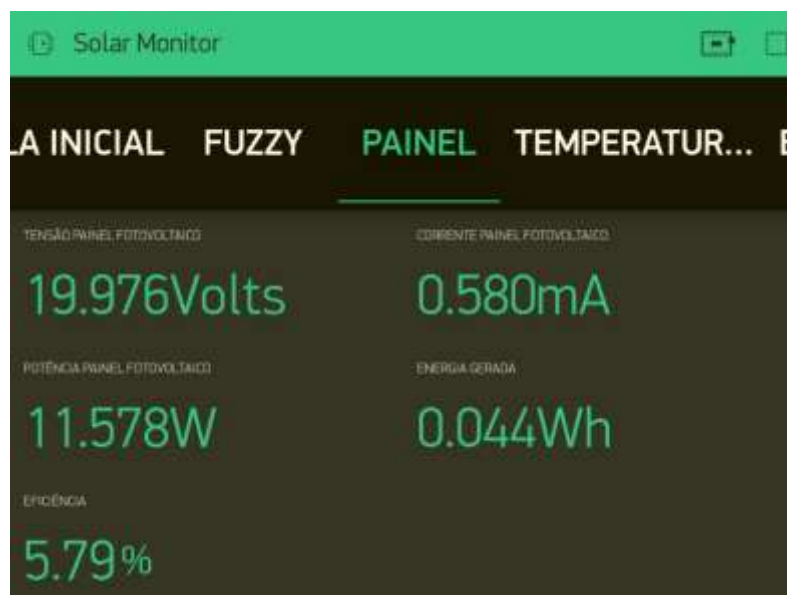
283 //=====Cáculo Tensão/Corrente/Potência=====
284 BlynkTimer volts;
285 void lervolts() {
286   Blynk.virtualWrite(V5, loadvoltage);
287   Blynk.virtualWrite(V6, current_mA);
288   Blynk.virtualWrite(V7, potencia);
289   Blynk.virtualWrite(V8, energia);
290
291   eficiencia = ((potencia / area) / 10);
292
293   Blynk.virtualWrite(V10, eficiencia);
294
295   temperatura_modulo = (mlx.readObjectTempC());
296   perda = ((1) - (temperatura_modulo - 25) * 0.0048);
297   potencia_estimada = (20 * 0.8 * media_irradiancia * perda);
298
299   Blynk.virtualWrite(V11, potencia_estimada / 1000);
300   Blynk.virtualWrite(V12, temperatura_modulo);
301 }
302 //=====

```

Fonte: Autoria Própria

A Figura 47 representa a eficiência do painel fotovoltaico, instalado com uma inclinação de 5° como é recomendado para a região em estudo (VIEIRA, 2014).

Figura 45: Eficiência do painel fornecida pelo supervisório



Fonte: Autoria Própria

Apesar da fabricante *Suntech* não informar qual a eficiência desse modelo de painel, para futuras comparações, é possível, a partir de suas características elétricas, ver Figura 48, descobrir tal eficiência por meio do teste *STC*.

Figura 46: Características elétricas do painel fotovoltaico

Characteristics	
Model	STP020S-12/Cb
Open circuit voltage (Voc)	21.4V
Optimum operating voltage(Vmp)	16.8 V
Short circuit current(Isc)	1.21A
Optimum operating current(Imp)	1.19A
Maximum power at STC(Pm)	20Wp

STC:Irradiance 1000W/m²,Module temperature 25°C,AM=1.5

Fonte: Suntech, 2019

Para isso, se fez necessário o uso da Equação 1, para o cálculo da eficiência, com base em suas características elétricas. Obtendo-se, assim, uma eficiência de 10%.

$$\eta = \left(\frac{20Wp}{1000W/m^2 \times 0,200m^2} \right) \times 100$$

$$\eta = 10\%$$

A análise entre a potência real (gráfico verde) e a potência estimada (gráfico amarelo) foi o próximo trecho da programação, o qual se dedicou a comparar a potência real gerada com base na corrente de máxima potência e na tensão de máxima potência, com a potência estimada que fora calculada de acordo com as Equações 3 e 4 (pág. 30), conforme ilustra a Figura 49.

Figura 47: Comparação entre a potência real e a potência estimada



Fonte: Autoria Própria

O último trecho da programação ficou à disposição do armazenamento das informações (*datalogger*), conforme ilustra a Figura 50, o qual armazena todas as informações fornecidas pelo supervisor como forma de segurança (*backup*) em um cartão de memória, pois caso a conexão com a rede caia o sistema permanece salvando as informações. Tal sistema tem capacidade para armazenar informações coletadas do disposto por aproximadamente 22 anos.

Figura 48: Armazenamento dos dados

Data	Hora	Irr (W/m²)	Temp (°C)	Temp módulo (°C)	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Real (W)	Potência Estimada (W)	Incidência Solar (%)	Eficiência (%)
18.11.2019	05.59.09	67	27	24.95	17.41	0.48	8.41	1.17	2	4.21
18.11.2019	05.59.20	75	27	25.07	17.38	0.39	6.71	1.07	2	4.21
18.11.2019	05.59.31	82	27	25.05	17.34	0.48	8.38	1.20	2	3.36
18.11.2019	05.59.41	81	27	24.75	17.30	0.39	6.69	1.31	2	4.19
18.11.2019	05.59.54	82	27	24.69	17.25	0.29	5.00	1.30	2	3.34
18.11.2019	06.00.05	81	27	24.53	17.23	0.29	4.99	1.31	2	2.50
18.11.2019	06.00.16	79	27	24.71	17.19	0.10	1.66	1.30	2	0.83
18.11.2019	06.00.25	78	27	24.53	17.14	0.29	4.97	1.27	2	2.48
18.11.2019	06.00.36	73	27	24.63	17.08	0.19	3.30	1.25	2	1.65
18.11.2019	06.00.46	69	27	24.51	17.03	0.48	8.22	1.17	2	4.11
18.11.2019	06.00.56	69	27	24.45	16.98	0.48	8.20	1.13	2	4.10
18.11.2019	06.01.06	66	27	24.41	16.94	0.39	6.55	1.11	2	

Fonte: Autoria Própria

3.3.5 Alimentação do dispositivo

O presente tópico será dedicado a montagem da alimentação do módulo de aquisição de dados do sistema supervisorio. Pensando em um sistema autônomo, que pudesse ficar em campo por longo período, optou-se por utilizar, assim, uma bateria de *lithium* de 5.000mAh, ver Figura 51, retirada de um carregador portátil. Como o projeto possui um consumo de

aproximadamente 90mAh, quando em funcionamento, e aproximadamente 50mAh em *Sleep Mode* (modo economia de energia), tal bateria, além de ser compacta, é capaz de alimentá-lo por cerca de 60 horas sem a necessidade de ser recarregada.

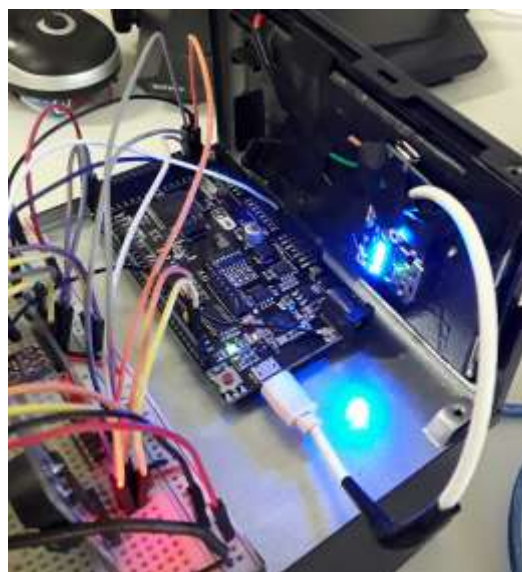
Figura 49: Bateria de 5000mAh para alimentação do sistema supervisorio



Fonte: Autoria Própria

No entanto, a bateria de *lithium* utilizada no projeto é de 3.7 V, que, por sua vez, possui uma tensão inferior ao mínimo necessário para alimentar o Arduino, que seria 5 V. Para suprir essa necessidade foi utilizado um módulo controlador de carga IP5306, esse módulo fornece ao Arduino uma tensão fixa de 5 V. A Figura 52 ilustra a alimentação da placa wemos atmega2560 *wifi* por meio de um controlador de carga.

Figura 50: Alimentação do sistema por meio de uma bateria de lithium de 5000mAh



Fonte: Autoria Própria

3.4 Montagem e encapsulamento do *hardware*

A Figura 53 ilustra o dispositivo para monitoramento de um painel fotovoltaico concluído. Tal dispositivo possui em sua composição uma chave liga-desliga de fácil manuseio, além de uma antena *wifi* para aumentar o alcance da comunicação. Além disso, o dispositivo é aterrado em sua própria carcaça, eliminando, dessa forma, possíveis ruídos no sistema e por conseguinte travamento no dispositivo.

Figura 51: Dispositivo para monitoramento de um painel fotovoltaico



Fonte: Autoria Própria

3.5 Custos dos Equipamentos

Considerou-se relevante para a avaliação do projeto uma estimativa de preços dos principais componentes utilizados no sistema. Os valores apresentados na Tabela 8 são uma estimativa aproximada dos preços para aquisição dos componentes para o sistema supervisor. A comparação de um sistema comercial com o desenvolvido nesse trabalho não foi possível, uma vez que foi encontrado no mercado um dispositivo com as mesmas características.

Tabela 4: Custo para elaboração do projeto

Item	Quantidade	Preço (R\$)
Placa mega <i>wifi</i>	1	52,00
Sensor INA 219	1	16,00
Sensor BME 280	1	22,00
Sensor MLX 90614	1	30,00
Protoboard	1	15,00
Amplificador	2	6,00
Resistores e Capacitores	-	5,00
Módulo RTC	1	10,00
Módulo MicroSD	1	30,00
Cartão de Memória	1	25,00
Antena <i>wifi</i> + Pigtail	1	5,00
Bateria	1	45,00
Total		261,00

Fonte: Autoria Própria

O preço do projeto ficou relativamente baixo, isso se deu por alguns fatores importantes. Em primeiro lugar, os componentes foram comprados em sites estrangeiros, o que diminuiu, em muito, o valor final do projeto. Em segundo lugar, não foram adicionados aos cálculos um roteador e um computador, visto que ambos equipamentos já se encontravam disponíveis, além de, nos dias atuais, a maioria possuir esses equipamentos em casa ou no escritório, não sendo necessário, dessa forma, a aquisição de tais equipamentos apenas para exercer devida função.

4 RESULTADOS

O presente capítulo irá analisar os resultados obtidos na coleta de dados de um painel fotovoltaico por meio de um dispositivo para monitoramento e aquisição de dados desenvolvido neste trabalho, além de comparar o sensor de irradiância solar desenvolvido com o piranômetro da estação meteorológica da UFERSA.

Os dados coletados pelo dispositivo como, irradiância solar, temperatura e umidade foram comparados com os dados gerados pela estação meteorológica da UFERSA, ambos no mesmo horário. Os dados do painel fotovoltaico como tensão, corrente, potência, temperatura de operação e sua eficiência serão analisados e comparados com relação aos dados fornecidos pela fabricante.

Os testes foram realizados por trás do prédio CITED, o qual possui uma micro usina solar de 3.5kWp. No entanto, a fim de testes, o dispositivo foi instalado e analisado em apenas um único painel fotovoltaico.

O teste, conforme mostra a Figura 54, consistiu em analisar o painel fotovoltaico (PV) instalado junto a usina solar de 3.5kWp situada por trás do CITED. Esse primeiro teste ocorreu das 6:30 às 17:20, com o intuito de testar a confiabilidade na transmissão dados e analisar como o dispositivo iria se comportar durante um dia inteiro de funcionamento.

Figura 52: Local onde foi realizado os testes



Fonte: Autoria Própria

O primeiro quesito observado foi quanto a conexão com o servidor e sua estabilidade, conforme ilustra a Figura 55. A conexão do dispositivo com o servidor *Blynk* se mostrou bastante estável. O Ping (*Packet Internet Network Grouper*), que serve para testar a

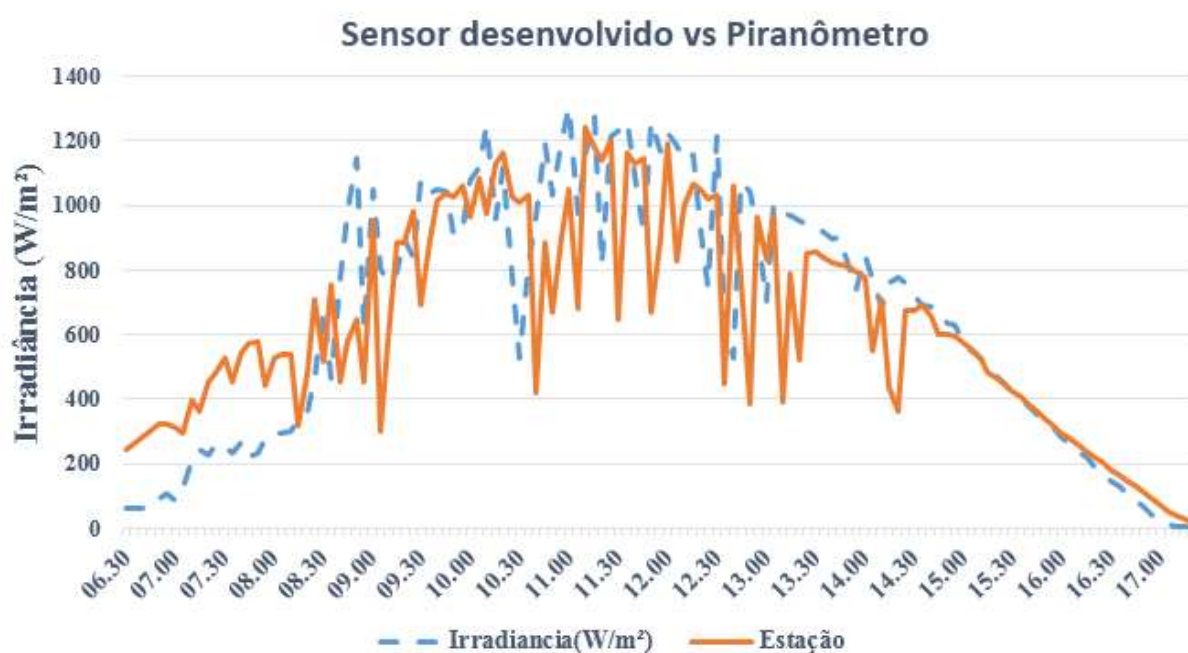
Figura 54: Local de instalação do sensor de irradiância solar



Fonte: Autoria Própria

No entanto, mesmo com a interferência do sombreamento sobre os painéis, os resultados foram bastante satisfatórios depois das 8:00 horas, conforme ilustra a Figura 57.

Figura 55: Comparativo entre a irradiância solar do sensor desenvolvido e o piranômetro



Fonte: Autoria Própria

A Figura 57 ilustra a comparação entre o sensor de irradiância solar desenvolvido neste projeto (gráfico tracejado) com o piranômetro presente na estação meteorológica da UFERSA. É possível observar que entre o período das 6:30 (o qual foi iniciado o teste) às 8:00 horas a diferença entre os sensores é grande. Essa diferença ocorre pelo fato de que os testes foram

realizados em local com alto índice de sombreamento pela parte da manhã, enquanto que a estação meteorológica é fixada em um local aberto, sem interferência de árvores ou prédios, conforme ilustra a Figura 58.

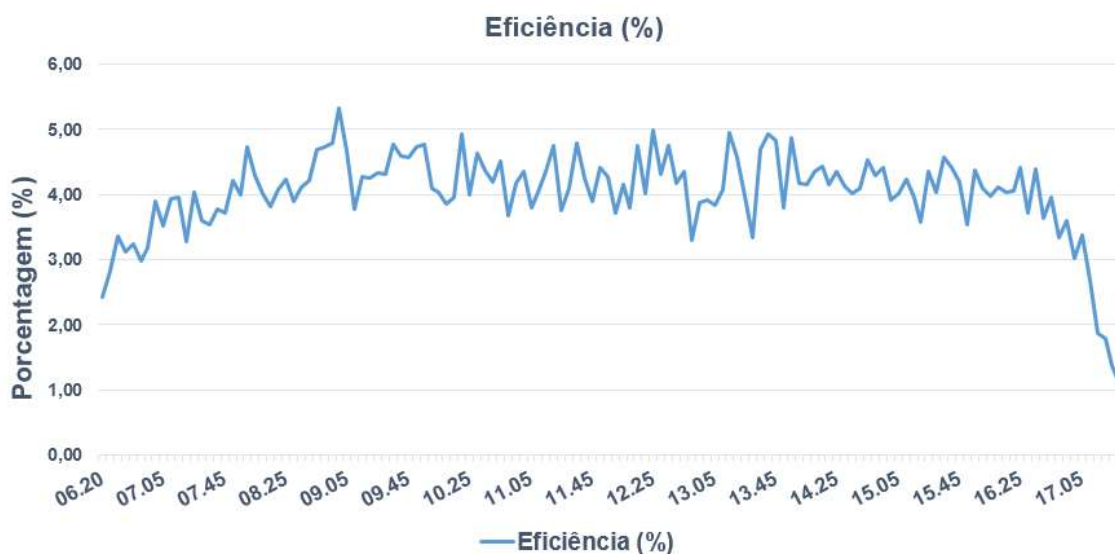
Figura 56: Estação meteorológica da usina solar da UFERSA



Fonte: Autoria Própria

O próximo teste realizado foi com relação a eficiência do painel fotovoltaico. É possível perceber, conforme ilustra a Figura 59, que a eficiência, por sua vez, não apresenta muita variação no decorrer do teste. Isso se dá por causa do seu princípio de conversão de energia solar em energia elétrica (efeito fotovoltaico), o qual tende a converter em energia elétrica qualquer incidência solar sobre suas células.

Figura 57: Eficiência obtida pelo dispositivo



Fonte: Autoria Própria

Além disso, de acordo com a Equação 1, foi possível obter uma eficiência de 10% para o painel utilizado neste trabalho, o que é uma eficiência, relativamente, baixa, pois segundo o EPIA (2008), a eficiência de um painel fotovoltaico a base de Silício Monocristalino deve ser entre 13-15%. Não obstante, a eficiência obtida pelo dispositivo durante os testes foi ainda menor. É possível observar, ainda, que, a partir das 8:00 horas a eficiência do painel tende a se estabilizar entre 5% até aproximadamente às 16:00 horas, horário esse que o sol não incide mais sobre o painel.

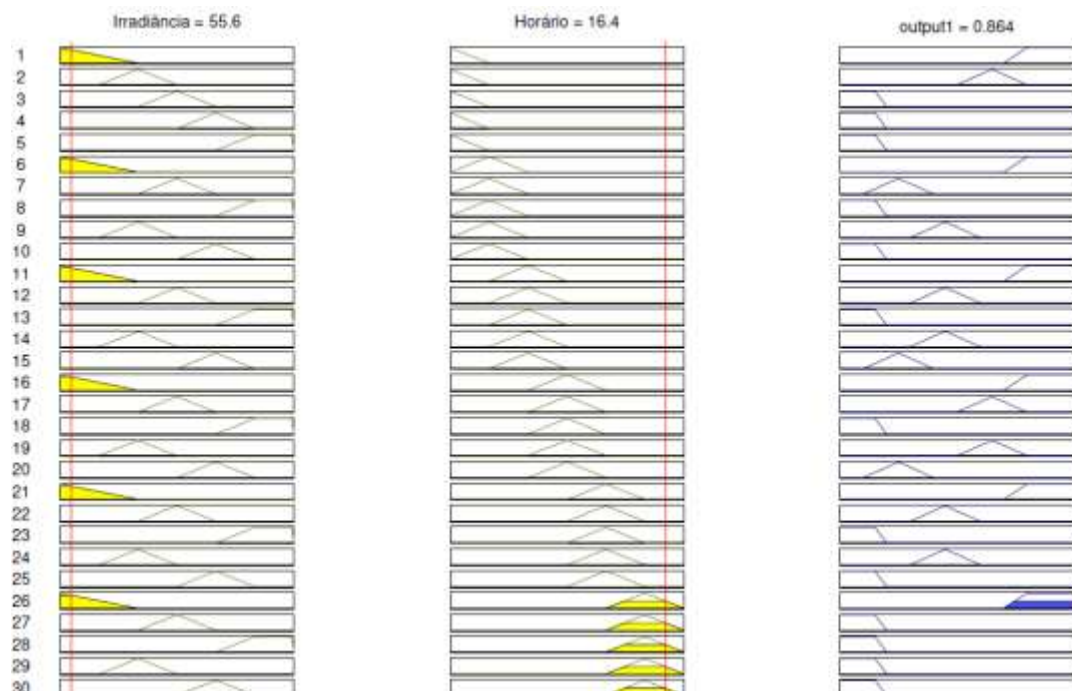
Nota-se que, a eficiência do painel utilizado neste trabalho é a metade da eficiência calculada de acordo com o padrão *STC*. Essa baixa eficiência pode ser por vários motivos como a má utilização do equipamento, temperatura de operação acima do nominal, tempo de vida útil, o qual as fabricantes dizem ser de aproximadamente 25 anos, quando utilizado em boas condições.

O que determinará o quão eficiente será um painel é, basicamente, o tipo de material da célula que esse usa, além de fatores como limpeza, temperatura incidente, tempo de uso, entre outros fatores que poderão vir a interferir em sua eficiência. Ou seja, um painel que não é feita manutenções periódicas ou é instalado em locais impróprios, sua vida útil tende a diminuir drasticamente. Quando se diz vida útil de um painel fotovoltaico, é a eficiência que esse possui para converter a energia solar em energia elétrica.

O próximo teste foi realizado por meio de um *software* de simulação, o qual fora feita a comparação entre os resultados da lógica *fuzzy* gerado pela simulação, ver Figura 60, e os resultados gerados pelo próprio dispositivo, ver Figura 61. De acordo com a Figura 60, percebe-se que o classificador *fuzzy* possui 30 regras, cada regra consiste em comparar a entrada (irradiância e horário) e mostrar a saída (incidência solar). Dessa forma, observa-se que no período de teste (16:40) a irradiância é de aproximadamente 60W/m², por conseguinte, a incidência solar sobre a superfície do painel solar tende a ser baixa (aproximadamente 14%), como mostra a Figura 61.

É válido lembrar que, a saída do simulador fornece o inverso do resultado fornecido pelo dispositivo, ou seja, enquanto o dispositivo fornece uma incidência de aproximadamente 14%, já o simulador mostra um resultado de aproximadamente 86%.

Figura 58: Simulação da lógica fuzzy



Fonte: Autoria Própria

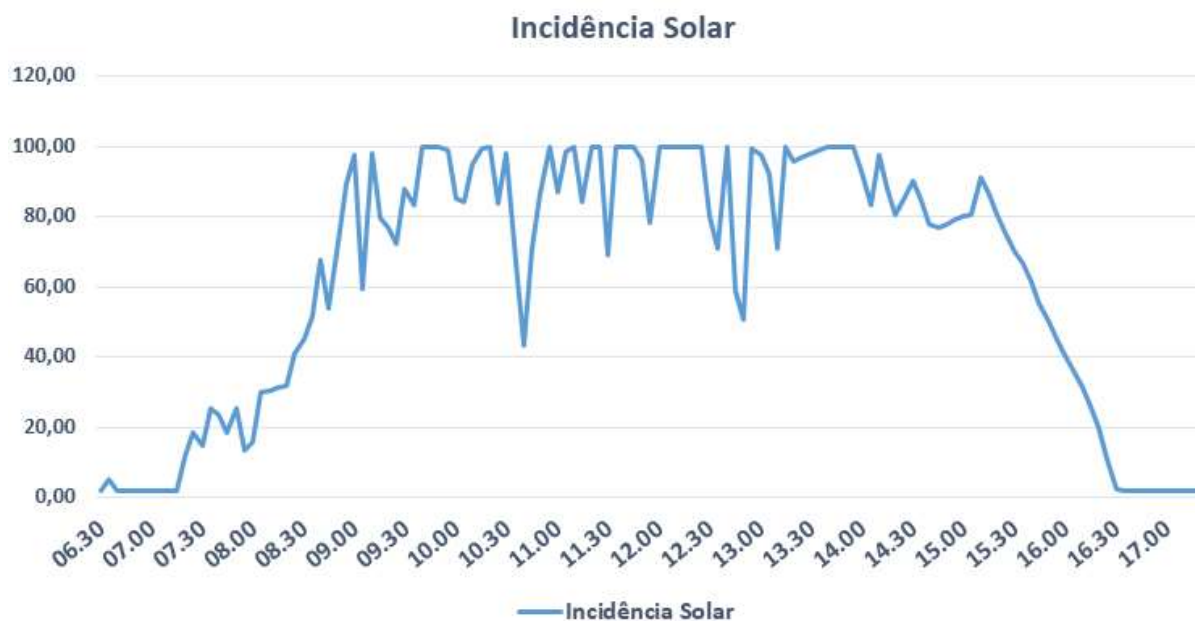
Esse teste foi feito com o intuito de validar a lógica *fuzzy* desenvolvida no dispositivo. O teste foi realizado às 16:40 horas com uma irradiância solar de 56 W/m², conforme ilustra a Figura 61. Com base nesses dados foi setado no simulador os mesmos valores de horário e irradiância (variáveis de entrada da lógica *fuzzy*), como mostra a Figura 60.

Figura 59: Lógica *fuzzy* implementada no supervisor *Blynk*

Fonte: Autoria Própria

A Figura 62 ilustra o comportamento da incidência solar sobre o painel fotovoltaico utilizado neste trabalho. Percebe-se que, entre o intervalo das 6:30 às 8:00 horas a incidência solar sobre o painel apresenta valores abaixo do esperado, comprovando, dessa forma, que o sombreamento, que ocorre nesse período, está diretamente ligado a irradiância solar.

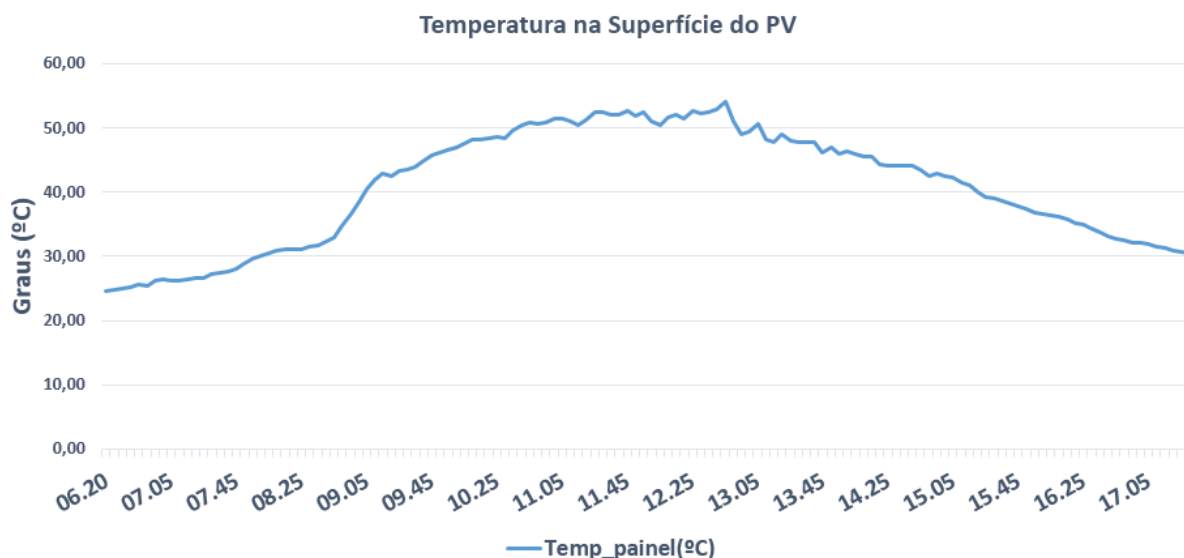
Figura 60: Incidência solar sobre a superfície do painel



Fonte: Autoria Própria

A temperatura incidente na superfície do painel fotovoltaico também foi analisada pelo dispositivo, conforme ilustra a Figura 63 notou-se que, a partir das 8:00 horas a temperatura na superfície fica acima dos 30°C, permanecendo assim até o final dos testes, às 17:30 horas. Foi possível notar, também, que entre às 10:30 e 13:00 hora a temperatura na superfície fica acima da temperatura nominal de operação, que é 50°C. Ademais, pode-se afirmar que o painel trabalha no mínimo 3 horas por dia acima da sua temperatura de operação adequada, que é de no máximo 50°C.

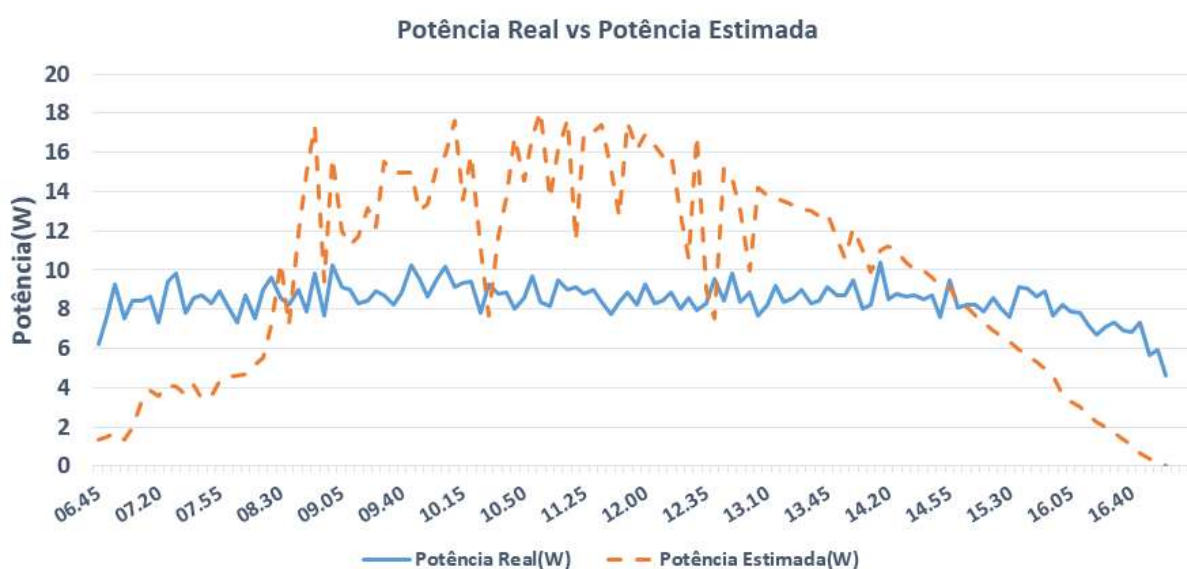
Figura 61: Temperatura na superfície do painel



Fonte: Autoria Própria

O último teste realizado no dispositivo foi feito a comparação entre a potência estimada (gráfico tracejado) e a potência real do painel. É possível observar, conforme ilustra a Figura 64, que a potência estimada acompanha a irradiância solar, isso ocorre devido a Equação 3 usar como base de cálculo a irradiância.

Figura 62: Comparação entre a potência estimada e a potência real



Fonte: Autoria Própria

A diferença entre a potência total estimada e a potência total real do painel ao final do dia é, relativamente, baixa. Enquanto a potência total estimada ao final do dia foi de 102 W,

gerando aproximadamente 10 Wh, o que é a metade estipulada pela fabricante, a potência total real do sistema obteve ao final do dia uma potência, ainda menor, de 92 W, gerando aproximadamente 9 Wh.

Ao se comparar uma potência com a outra percebe-se que as diferenças entre elas são pequenas, aproximadamente 10 W no dia. No entanto, está sendo analisado apenas um único painel fotovoltaico, de potência máxima, declarada pela fabricante, de 20Wp. Ao multiplicar a quantidade de painel por 100 (com as mesmas características e lote de fabricação), é possível chegar a uma potência de 10,2kW e 9,2kW respectivamente e, com base nas diferenças entre a potência estimada e a potência real, chegaríamos em uma diferença de 1kW por dia.

A partir desses resultados é possível afirmar que a potência de um sistema fotovoltaico está diretamente ligada à sua eficiência. Além disso, foi possível notar que, a eficiência do painel em estudo, segundo o padrão *STC*, era de 10% o que já é uma eficiência baixa de acordo com o EPIA (2008). No entanto, constatou-se que, a eficiência do painel em estudo informada pelo dispositivo foi de aproximadamente 5%, ou seja, a metade especificada pela fabricante. Esse dado foi comprovado quando se obteve a potência do painel, a qual também foi a metade especificada pela fabricante.

4.1 Dificuldades Encontradas

No decorrer da elaboração do projeto foram surgindo diversos obstáculos, os quais serão destacados neste tópico e as soluções que foram tomadas a fim de resolver tais problemas.

Em primeiro lugar, deparou-se com a falta de um sensor de irradiância solar de precisão para uso tanto em pesquisas quanto para elaboração de projetos acadêmicos. A solução nesse caso foi a elaboração de um piranômetro de baixo custo utilizando-se como sensor uma célula fotovoltaica. No entanto, como relatado no tópico respectivo ao desenvolvimento do sensor, o uso de células fotovoltaicas como sensor não fornece a precisão necessária para fins acadêmicos. Ocorrendo, assim, a necessidade de trocar o componente sensor (célula fotovoltaica) ou utilizar técnicas de condicionamento do sinal. Neste trabalho foi utilizada a última opção, criando, assim, um circuito condicionador de sinal através de um amplificador operacional TL062.

A calibração do sensor foi outra dificuldade no decorrer do trabalho, uma vez que não tinha disponível um piranômetro de precisão para a realização dos devidos testes. A solução para o devido problema foi tomar como base a estação meteorológica da UFERSA. No entanto,

não foi possível ter uma margem segura dos dados, pois a estação se encontrava a aproximadamente 2km (dois quilômetros) do local da pesquisa e os dados eram gerados a cada 5 (cinco) minutos. Mas para fins de pesquisa o piranômetro desenvolvido se mostrou satisfatório, com o sinal linearizado e com pouca diferença entre a estação meteorológica de referência.

A implementação de uma lógica *fuzzy* para funcionar em uma placa microcontroladora foi outra dificuldade, uma vez que a biblioteca disponível para Arduino (eFLL) não engloba todas as funções de pertinência, apenas a função trapezoidal. Tal problema foi solucionado alterando a lógica que tinha sido feita em *software* de simulação com a função triangular para a forma trapezoidal e comparando os resultados.

Além disso, obteve-se dificuldades para declarar quais seriam as melhores variáveis linguísticas a serem analisadas no classificador *fuzzy*. Como o objetivo era monitorar a incidência solar sobre um painel fotovoltaico, foi analisado em primeira instância as variáveis linguísticas tensão e irradiância solar, uma vez que ambas impactam diretamente na geração de energia dos painéis fotovoltaicos. No entanto, ao analisar o comportamento da tensão percebeu-se que quanto maior era a temperatura incidente no painel menor era a tensão gerada, comprovando o que a teoria dizia. Dessa forma não seria possível analisar apenas a tensão, teria que ser analisado a variável linguística temperatura, o que tornaria o classificador *fuzzy* maior e mais complexa.

Assim, para fins de testes foi decidido usar como variáveis linguísticas de entrada a irradiância solar (erro) e o horário do dia (variação do erro). Dessa forma, bastou analisar um gráfico de irradiância solar em um dia perfeito (dia de céu limpo) e fazer as devidas funções de pertinência com base nesse gráfico, de modo que, o classificador *fuzzy* entendesse que quando fosse 12:00 horas (meio dia) e a irradiância estivesse abaixo dos 1000 W/m² a incidência solar sobre a superfície do painel estaria abaixo do classificado como ideal.

Por fim, outras dificuldades foram aparecendo, como foi o caso de Interferência Eletromagnética (EMI). Esse termo é frequentemente usado no ramo da eletrônica para expressar ruídos que interferem na transmissão de informações ou mesmo no funcionamento do circuito. Não se sabe ao certo se tal interferência se deu pelo fato do circuito ficar fixado em baixo de um sistema fotovoltaico de 3.5kWp ou pelo fato de utilizar um circuito para aproveitar a energia solar para carregar as baterias. Fato é que, a solução se deu alterando a estrutura do projeto, que antes tinha sido feita em uma impressora 3D e atualmente a estrutura é uma carcaça de fonte de computador, que serve também para aterrar o próprio Arduino, funcionando como uma gaiola de *Faraday*.

5 CONCLUSÃO

A utilização de um supervisor com interface simples e moderna, como é o caso do *Blynk*, foi de grande valia para o projeto, uma vez que, fornece de forma clara e precisa os dados gerados pelo painel fotovoltaico, assim como pelos sensores.

Por conseguinte, a comunicação via *wifi* entre o supervisor e o servidor se mostrou estável por todo período. A escolha por um servidor próprio tornou o sistema independente. No entanto, só é possível acessar tal servidor a no máximo 250m de distância, o que tornou uma desvantagem.

Já na parte de *hardware* problemas de ruídos levaram o supervisor à instabilidade, fazendo com que o microcontrolador reinicia-se quando a bateria estava sendo carregada. A solução encontrada foi a compra de um circuito integrado exclusivo para carregamento de baterias enquanto essas alimentavam o microcontrolador.

O classificador *fuzzy* se mostrou bastante satisfatório no monitoramento da incidência solar sobre a superfície do painel fotovoltaico, apresentando como principais vantagens: a não necessidade de uma modelagem matemática para o sistema e a possibilidade de confrontar conhecimentos heurísticos com a dinâmica do sistema.

Ademais, com relação a eficiência do painel fotovoltaico é possível observar que a potência, tanto estimada quanto real, obedece a eficiência do painel, ou seja, de acordo com o padrão *STC* a eficiência do painel utilizado neste trabalho deveria ser de 10%, no entanto, observou-se que a eficiência obtida foi de no máximo 5%, ou seja, metade do que deveria ser o ideal. Por conseguinte, as potências também geraram apenas a metade do indicado pela fabricante, que seria 20Wp. Logo, conclui-se que, a geração de um painel fotovoltaico está diretamente relacionada com a sua eficiência, quanto mais eficiente for o painel, melhor será sua geração de energia elétrica. Assim, foi concluído que fatores como a alta temperatura incidente no painel, a falta de manutenção e a instalação em locais inadequados ajudaram na baixa eficiência desse painel. Com isso, o uso de um dispositivo para monitoramento e aquisição de dados em tempo real de um sistema fotovoltaico se mostrou indispensável para o prolongamento da vida útil de um painel fotovoltaico e, por conseguinte, sua eficiência.

5.1 Trabalhos Futuros

A partir dos diversos testes realizados em campo, bem como o amplo conhecimento adquirido no decorrer da elaboração deste projeto, foi observado algumas melhorias a serem feitas, de modo que, futuros bolsistas possam implementá-los. Tais melhorias serão descritas a seguir:

- Implementação de um circuito impresso para o projeto em questão, de modo a eliminar cabos e conseqüentemente diminuir ruídos.
- Utilizar um protocolo de comunicação diferente e comparar ao utilizado neste trabalho.
- Adicionar mais painéis fotovoltaicos ao projeto e analisar o desempenho do sistema.
- Implementar um sistema de coleta de energia elétrica do ambiente para o carregamento das baterias.
- Estimar as perdas na geração de um painel fotovoltaico através do supervisorio projetado.
- Implementação de um modo de economia de bateria (*sleep mode*) para uma maior duração da bateria.
- Implementar um controle *fuzzy* mais sofisticado, com mais variáveis linguísticas, com a finalidade de detectar com mais precisão possíveis sombreamentos ou defeitos no painel fotovoltaico.
- Desenvolvimento de um sensor de irradiância solar com fotodetectores e comparar com o sensor desenvolvido neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABGD, Associação Brasileira de Geração Distribuída. **Geração Distribuída**. Disponível em: <<https://www.geracaodistribuida.org/copia-mapa-do-mercado-2>>. Acesso em: 28 jun. 2019.

ALONSO, Rafael Herrero. **Posicionamento eficiente de módulos fotovoltaicos em plantas solares no ambiente urbano**. 2016. 219 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Geração Distribuída – Micro e MiniGeração. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=757&idPerfil=2>>. Acesso em: 28 jun. 2019.

_____. Resolução Normativa nº 687. Brasília: ANEEL, 2015b. 26p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>> Acesso em: 28 jun. 2019.

_____. Programas de Incentivo às Fontes Alternativas. Brasília: ANEEL, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/proinfa>> Acesso em: 28 jun. 2019.

ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais 4º Trimestre de 2018**. 2019. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+-+4%C2%BA+trimestre+de+2018/36e91555-141a-637d-97b1-9f6946cc61b3?version=1.2>>. Acesso em: 29 jun. 2019.

AOKI, Tiago de Oliveira. **Controle da Temperatura e Umidade Relativa do Ar em Ambientes Utilizando Controlador Fuzzy na Abertura de Janelas**. 2014. 70 f. Monografia - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

BADAVE, Prutha & Karthikeyan, B. & Badave, Sunita & Bhaskar Ranjana, Mahajan & Sanjeevikumar, P. & Gill, Gurjit. (2016). Health Monitoring System of Solar Photovoltaic Panel: An Internet of Things Application. Lecture Notes in Electrical Engineering.

BARG, Eduardo Klaus. **Protótipo de um Controlador de Temperatura Baseado em Lógica Fuzzy Utilizando um Microcontrolador**. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências da Computação, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2002.

BEHRENS, Frank; BARBOSA, Karen Garcez; TEIXEIRA, Igor T. Tenório. **Monitoramento da Eficiência de Conversão de Energia de Painéis Fotovoltaicos**. Brazilian Technology Symposium, Campinas, p.1-4, 2016.

Brasil. Decreto no 5163 de 30 de Julho de 2004. Diário Oficial, Brasília, 30 de Julho de 2004. CARNEIRO, Joaquim. Semicondutores - Modelo Matemático da Célula Fotovoltaica. In: CARNEIRO, Joaquim. Electromagnetismo B. Guimarães: Universidade do Minho, 2010. p. 36.

CÂNDIDO, Diogo Brum. **Controle Supervisório Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Autônomos com Topologia Multi String**. 2010. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

COSTA, Manuella de Farias Nardelli. **INTERNET DAS COISAS: A PROTEÇÃO DA PRIVACIDADE EM UM MUNDO CONECTADO**. 2019. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Administração, Escola Nacional de Administração Pública, Brasília, 2019.

CUNHA, Allison Cristian. **Utilização de Hardware Livre para Implementação de Controlador de Bombeio Centrífugo Submerso Aplicado em Poços Produtores de Petróleo**. 2017. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2017.

DALLACORTE, Fabiano Cislighi. **Geração distribuída no Brasil: o cenário atual**. 2019. Disponível em: <<https://sebraers.com.br/energia/geracao-distribuida-no-brasil-o-cenario-atual/>>. Acesso em: 29 jun. 2019.

DE PAULA, J. F. S.; RIBEIRO, G. B.; FIGUEIRÊDO, V. B. **Confecção e Análise de um Piranômetro Fotovoltaico de Baixo Custo**. 2018. 11 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018.

DUARTE, Mayke. A, et al. (2019). **Supervisório para Monitoramento de Geração da Energia Elétrica por Painéis Fotovoltaicos**.

DURRENBERGER, Mark. **STC vs. PTC: Why Solar Panel Testing Matters**. 2015. Disponível em: <<https://newenglandcleanenergy.com/energymiser/2015/12/01/stc-vs-ptc-why-solar-panel-testing-matters/>>. Acesso em: 31 out. 2019.

Energy Monitoring—Solar Results to the Web. Disponível em: <<http://www.rmeter.com/>> . Acesso em: 17 de nov. 2019.

European Photovoltaic Industry Association (EPIA). (2008): Solar Generation. Disponível em: <www.epia.org>. Acesso em 5 de novembro de 2019.

FREIRE, Luiz Abelardo Dantas. **Desenvolvimento de um Piranômetro Fotovoltaico**. 2008. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

GAD, Hesham & GAD, Helmy. (2015). Development of a new temperature data acquisition system for solar energy applications. *Renewable Energy*. 74. 337-343. 10.1016/j.renene.2014.08.006.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energias Renováveis: um futuro sustentável. *Revista USP*. São Paulo. Número 72. p. 6-15, dezembro/fevereiro 2006-2007.

GOMIDE, F.; GUDWIN, R.; TANSCHKEIT, R. (1995) Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy. *Lógica fuzzy e aplicações*. In: *Proceedings 6th IFSA World Congress, Tutorials*, pp.1-38, São Paulo, Brasil.

HALMEMAN, Radames Juliano. **Desenvolvimento de um sistema para monitoramento remoto em centrais de microgeração fotovoltaica**. 2014. 202 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2014.

HECKTHEUER, L.A., KRENZINGER, A., PRIEB, C.W.M., 2002. Methodology for Photovoltaic Modules Characterization and Shading Effects Analysis, Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences, 24: 26 – 31.

HORN, Ricardo Adriano. **Atuador sem Fio para Aplicações em Automação Residencial**. 2018. 62 f. Monografia (Especialização) - Curso de Tecnologia em Eletrônica Industrial, Universidade Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

INEE, Instituto Nacional de Eficiência Energética. **O que é Geração Distribuída**. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp>. Acesso em: 28 jun. 2019.

KRIDI, D. S.; ALVES, A. J. O.; Lemos, M. V. S.; Ricardo de Andrade de Lira Rabelo. Desenvolvimento de uma Biblioteca Fuzzy Para o Controle Autônomo de um Robô Móvel em Ambiente Desconhecido. In: Mostra Nacional de Robótica, 2011, São João del Rei. Anais da I Mostra Nacional de Robótica (MNR 2011). Sorocaba: Unesp, 2011. p. 155-161.

LEAL, L. B., (2011). Uma Abordagem para Estimação da Qualidade de Rotas em Redes de Sensores Sem Fio Multi-Sink Baseada em Sistemas Fuzzy Genéticos. Dissertação de Mestrado em Informática Aplicada. Universidade de Fortaleza.

Learn Sparkfun. MLX90614 IR Thermometer Hookup Guide. Disponível em: <<https://learn.sparkfun.com/tutorials/mlx90614-ir-thermometer-hookup-guide/all>>. Acesso em: 17 nov. 2019.

OVERSTRAETEN, R. W.; MERTENS, R. P. **Physics, technology and use of photovoltaics**. Londres: Modern Energy Studies, 1996, 277p.

O SETOR ELÉTRICO: Sistemas Conectados à Rede Elétrica. São Paulo: Atitude, 2013.
PERREIRA JUNIOR, Luiz Carlos. **A Interação entre Geradores Solares Fotovoltaicos e Veículos Elétricos Conectados À Rede Elétrica Pública**. 2011. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

RAMPINELLI, G. & KRENZINGER, Arno. (2006). **Efeito do Sombreamento em Células de Uma Associação de Módulos Fotovoltaicos Conectados à Rede**. Disponível em: <<http://www.researchgate.net/publication/237488264>>. Acesso em: 14. Out. 2019.

RIBEIRO, Alexandre Luiz. **Desenvolvimento de um Sistema de Aquisição de dados e um Programa Supervisório para Monitoramento de Geração de Energia Fotovoltaica**. 2017. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Automação Industrial, Centro Federal de Educação Tecnológico de Minas Gerais, Araxá, 2017.

ROCHA, Amanda Suianny Fernandes. **Previsão do Desempenho de um Sistema Solar Fotovoltaico Conforme Dados Meteorológicos da Região**. 2019. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019.

SANTIAGO, Gregory Luid Souza. **Microgeração Solar Fotovoltaica Conectada à Rede: Análise da Qualidade da Energia**. 2017. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia

Elétrica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2017.

SANTOS, Bruno P. et al. **Internet das Coisas: da Teoria à Prática**. Belo Horizonte: Ufmg, 2016.

SARAIVA, Ana Luiza Bezerra da Costa; VALE, Cláudia Câmara do; ZANELLA, Maria Eliza. **Comportamento dos Elementos Climáticos no Município de Mossoró (rn) e os Impactos na Saúde Humana**. Geointerações, Assú, v. 1, n. 1, p.87-107, 2017.

SEGUEL, Julio Igor LÓpez. **Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia Usando Técnica MPPT e Controle Digital**. 2009. 222 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SIMÕES, Marcelo Godoy; SHAW, Ian S.. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2007. 186 p.

SUNTECH. **Módulo Solar Silício Monocristalino**. 2019. Disponível em: <<https://www.energymatters.com.au/images/suntech/STP020S-12Cb.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2019.

TAVARES, Carlos António Pereira. **Estudo Comparativo de Controladores Fuzzy Aplicados a um Sistema Solar Fotovoltaico**. 2009. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2009

VIEIRA, Romênia Gurgel. **ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO ENTRE UM PAINEL SOLAR ESTÁTICO E COM RASTREAMENTO NO MUNICÍPIO DE MOSSORÓ-RN**. 2014. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2014.

YAHYAOU, Imene; SEGATTO, Marcelo. A practical technique for on-line monitoring of a photovoltaic plant connected to a single-phase grid. 2017. Disponível em:. Acesso em: 22 jan. 2019.

ZANESCO, Izete. **Análise e Contrução de um Piranômetro Fotovoltaico**. 1991. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

ANEXO 1 – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO TL062

PARAMETER		TEST CONDITIONS ⁽¹⁾		TL061C, TL062C, TL064C			TL061AC, TL062AC, TL064AC			UNIT
				MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
V _{IO}	Input offset voltage	V _O = 0, R _S = 50 Ω	T _A = 25°C	3		15	3		6	mV
			T _A = Full range			20			7.5	
α _{VIO}	Temperature coefficient of input offset voltage	V _O = 0, R _S = 50 Ω, T _A = Full range		10			10			μV/°C
I _{IO}	Input offset current	V _O = 0	T _A = 25°C	5		200	5		100	pA
			T _A = Full range			5			3	nA
I _{IB}	Input bias current ⁽²⁾	V _O = 0	T _A = 25°C	30		400	30		200	pA
			T _A = Full range			10			7	nA
V _{ICR}	Common-mode input voltage range	T _A = 25°C		±11	−12 to 15		±11	−12 to 15		V
V _{OM}	Maximum peak output voltage swing	R _L = 10 kΩ, T _A = 25°C		±10	±13.5		±10	±13.5		V
		R _L ≥ 10 kΩ, T _A = Full range		±10			±10			
A _{VD}	Large-signal differential voltage amplification	V _O = ±10 V, R _L ≥ 2 kΩ	T _A = 25°C	3	6		4	6		V/mV
			T _A = Full range	3			4			
B ₁	Unity-gain bandwidth	R _L = 10 kΩ, T _A = 25°C		1			1			MHz
r _i	Input resistance	T _A = 25°C		10 ¹²			10 ¹²			Ω
CMRR	Common-mode rejection ratio	V _{IC} = V _{ICR} min, V _O = 0, R _S = 50 Ω, T _A = 25°C		70	86		80	86		dB
k _{SVR}	Supply-voltage rejection ratio (ΔV _{CC±} /ΔV _{IO})	V _{CC} = ±9 V to ±15 V, V _O = 0, R _S = 50 Ω, T _A = 25°C		70	95		80	95		dB
P _D	Total power dissipation (each amplifier)	V _O = 0, No load, T _A = 25°C		6		7.5	6		7.5	mW
I _{CC}	Supply current (each amplifier)	V _O = 0, No load, T _A = 25°C		200		250	200		250	μA
V _{O1} /V _{O2}	Crosstalk attenuation	A _{VD} = 100, T _A = 25°C		120			120			dB

ANEXO 2 – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO SENSOR INA 219

Recommended Operating Conditions

($T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , unless otherwise noted.) (Notes 2, 3)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	V_{CC}		2.3	3.3	5.5	V
	V_{BAT}		2.3	3.0	5.5	V
Logic 1 Input SDA, SCL	V_{IH}		0.7 x V_{CC}		$V_{CC} + 0.3$	V
Logic 0 Input SDA, SCL	V_{IL}		-0.3		0.3 x V_{CC}	V

Electrical Characteristics

($V_{CC} = 2.3V$ to $5.5V$, V_{CC} = Active Supply (see Table 1), $T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , unless otherwise noted.) (Typical values are at $V_{CC} = 3.3V$, $V_{BAT} = 3.0V$, and $T_A = +25^\circ C$, unless otherwise noted.) (Notes 2, 3)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Active Supply Current	I_{CCA}	(Notes 4, 5)	$V_{CC} = 3.63V$		200	μA
			$V_{CC} = 5.5V$		300	
Standby Supply Current	I_{CCS}	I ² C bus inactive, 32kHz output on, SQW output off (Note 5)	$V_{CC} = 3.63V$		110	μA
			$V_{CC} = 5.5V$		170	
Temperature Conversion Current	$I_{CCSCONV}$	I ² C bus inactive, 32kHz output on, SQW output off	$V_{CC} = 3.63V$		575	μA
			$V_{CC} = 5.5V$		650	
Power-Fail Voltage	V_{PF}		2.45	2.575	2.70	V
Logic 0 Output, 32kHz, $\overline{INT}/SQW$, SDA	V_{OL}	$I_{OL} = 3mA$			0.4	V
Logic 0 Output, $\overline{RST}$	V_{OL}	$I_{OL} = 1mA$			0.4	V
Output Leakage Current 32kHz, $\overline{INT}/SQW$, SDA	I_{LO}	Output high impedance	-1	0	+1	μA
Input Leakage SCL	I_{LI}		-1		+1	μA
$\overline{RST}$ Pin I/O Leakage	I_{OL}	$\overline{RST}$ high impedance (Note 6)	-200		+10	μA
V_{BAT} Leakage Current (V_{CC} Active)	I_{BATLKG}			25	100	nA
Output Frequency	f_{OUT}	$V_{CC} = 3.3V$ or $V_{BAT} = 3.3V$		32.768		kHz
Frequency Stability vs. Temperature (Commercial)	$\Delta f/f_{OUT}$	$V_{CC} = 3.3V$ or $V_{BAT} = 3.3V$, aging offset = 00h	0°C to +40°C		±2	ppm
			>40°C to +70°C		±3.5	
Frequency Stability vs. Temperature (Industrial)	$\Delta f/f_{OUT}$	$V_{CC} = 3.3V$ or $V_{BAT} = 3.3V$, aging offset = 00h	-40°C to <0°C		±3.5	ppm
			0°C to +40°C		±2	
			>40°C to +85°C		±3.5	
Frequency Stability vs. Voltage	$\Delta f/V$			1		ppm/V
Trim Register Frequency Sensitivity per LSB	$\Delta f/LSB$	Specified at:	-40°C		0.7	ppm
			+25°C		0.1	
			+70°C		0.4	
			+85°C		0.8	
Temperature Accuracy	Temp	$V_{CC} = 3.3V$ or $V_{BAT} = 3.3V$	-3		+3	°C
Crystal Aging	$\Delta f/f_O$	After reflow, not production tested	First year		±1.0	ppm
			0–10 years		±5.0	

ANEXO 3 – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO SENSOR BME 280

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Supply Voltage Internal Domains	V_{DD}	ripple max. 50 mVpp	1.71	1.8	3.6	V
Supply Voltage I/O Domain	V_{DDIO}		1.2	1.8	3.6	V
Sleep current	I_{DDSL}			0.1	0.3	μA
Standby current (inactive period of normal mode)	I_{DDSB}			0.2	0.5	μA
Current during humidity measurement	I_{DDH}	Max value at 85 °C		340		μA
Current during pressure measurement	I_{DDP}	Max value at -40 °C		714		μA
Current during temperature measurement	I_{DDT}	Max value at 85 °C		350		μA
Start-up time	$t_{startup}$	Time to first communication after both $V_{DD} > 1.58$ V and $V_{DDIO} > 0.65$ V			2	ms
Power supply rejection ratio (DC)	PSRR	full V_{DD} range			± 0.01 ± 5	%RH/V Pa/V
Standby time accuracy	$\Delta t_{standby}$			± 5	± 25	%

ANEXO 3.1 Especificações do Sensor de Temperatura

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Operating range	T	Operational	-40	25	85	°C
		Full accuracy	0		65	°C
Supply current	$I_{DD,T}$	1 Hz forced mode, temperature measurement only		1.0		μA
Absolute accuracy temperature ¹¹	$A_{T,25}$	25 °C		± 0.5		°C
	$A_{T,full}$	0...65 °C		± 1.0		°C
Output resolution	R_T	API output resolution	0.01			°C
RMS noise	N_T	Lowest oversampling		0.005		°C

ANEXO 3.2 Especificações do sensor de Umidade

Parameter	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Operating range ³	R_H	For temperatures < 0 °C and > 60 °C see Figure 1	-40	25	85	°C
			0		100	%RH
Supply current	$I_{DD,H}$	1 Hz forced mode, humidity and temperature		1.8	2.8	μA
Absolute accuracy tolerance	A_H	20...80 %RH, 25 °C, including hysteresis		±3		%RH
Hysteresis ⁴	H_H	10→90→10 %RH, 25 °C		±1		%RH
Nonlinearity ⁵	NL_H	10→90 %RH, 25 °C		1		%RH
Response time to complete 63% of step ⁶	$\tau_{63\%}$	90→0 or 0→90 %RH, 25°C		1		s
Resolution	R_H			0.008		%RH
Noise in humidity (RMS)	N_H	Highest oversampling, see chapter 3.6		0.02		%RH
Long term stability	ΔH_{stab}	10...90 %RH, 25 °C		0.5		%RH/ year

ANEXO 4 – CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO SENSOR MLX90614

Parameter	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Units
Supplies						
External supply	V_{DD}		4.5	5	5.5	V
Supply current	I_{DD}	No load			1	mA
Supply current (programming)	I_{DDpr}	No load, erase/write EEPROM operations			1.5	mA
Zener voltage	V_Z	$I_Z = 75 \dots 400 \mu A$	5.6	5.75	5.8	V
Zener voltage	$V_Z(T_a)$	$I_Z = 70 \dots 400 \mu A$, full temperature range	5.15	5.75	6.24	V
Power On Reset						
POR level	V_{POR}	Power-up, power-down and brown-out	2.7	3.0	3.3	V
V_{DD} rise time	T_{POR}	Ensure POR signal			3	ms
Output valid (result in RAM)	T_{valid}	After POR		0.15		s
Pulse width modulation ¹						
PWM resolution	PWM_{res}	Data band		10		bit
PWM output period	$PWM_{T,def}$	Factory default, internal oscillator factory calibrated		1.024		ms
PWM period stability	$dPWM_T$	Internal oscillator factory calibrated, over the entire operation range and supply voltage	-4		+4	%
Output high Level	PWM_{HI}	$I_{source} = 2 \text{ mA}$	$V_{DD}-0.2$			V
Output low Level	PWM_{LO}	$I_{sink} = 2 \text{ mA}$			$V_{SS}+0.2$	V
Output drive current	$I_{drive_{PWM}}$	$V_{out,H} = V_{DD} - 0.8V$		20		mA
Output sink current	$I_{sink_{PWM}}$	$V_{out,L} = 0.8V$		20		mA
Output settling time	T_{set}	100 pF capacitive load, full operating T_a range		500	TBD	ns
Output settling time	T_{setRC}	220 Ohm in series with 47nF load on the wire, full T_a operating range	20		50	us

Parameter	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Units
SMBus compatible 2-wire interface ²						
Input high voltage	V_{IH}		1.8	2	2.2	V
Input high voltage	$V_{IH}(Ta, V)$	Over temperature and supply	1.6		2.4	V
Input low voltage	V_{IL}		0.7	1.0	1.3	V
Input low voltage	$V_{IL}(Ta, V)$	Over temperature and supply	0.5		1.5	V
Output low voltage	V_{OL}	SDA pin in open drain mode, over temperature and supply, $I_{sink} = 2mA$			0.2	V
SCL leakage	$I_{SCL, leak}$	$V_{SCL}=4V, Ta=+85^{\circ}C$			30	μA
SDA leakage	$I_{SDA, leak}$	$V_{SDA}=4V, Ta=+85^{\circ}C$			0.3	μA
SCL capacitance	C_{SCL}				10	pF
SDA capacitance	C_{SDA}				10	pF
Slave address	SA	Factory default		5Ah		hex
SMBus Request	t_{REQ}	SCL low	1.024			ms
Timeout, low	$T_{imeout, L}$	SCL low			30	ms
Timeout, high	$T_{imeout, H}$	SCL high			50	μs
Acknowledge setup time	$T_{suac}(MD)$	8-th SCL falling edge, Master	0.5		1.5	μs
Acknowledge hold time	$T_{hdac}(MD)$	9-th SCL falling edge, Master	1.5		2.5	μs
Acknowledge setup time	$T_{suac}(SD)$	8-th SCL falling edge, Slave	2.5			μs
Acknowledge hold time	$T_{hdac}(SD)$	9-th SCL falling edge, Slave	1.5			μs
EEPROM						
Data retention		$Ta = +85^{\circ}C$	10			years
Erase/write cycles		$Ta = +25^{\circ}C$	100,000			Times
Erase/write cycles		$Ta = +125^{\circ}C$	10,000			Times
Erase cell time	T_{erase}			5		ms
Write cell time	T_{write}			5		ms

ANEXO 5 – DATASHEET DO PAINEL FOTOVOLTAICO

Specifications

Cell	Monocrystalline silicon solar cells 125mm×31.25mm
No. of cells and connections	36 (2×18)
Dimension of module(mm)	656×306×18
Weight	2.5 kg

Limits

Operating temperature	-40 to +85℃
Maximum system voltage	1000 V DC

Characteristics

Model	STP020S-12/Cb
Open circuit voltage (Voc)	21.4V
Optimum operating voltage(Vmp)	16.8 V
Short circuit current(Isc)	1.21A
Optimum operating current(Imp)	1.19A
Maximum power at STC(Pm)	20Wp

STC: Irradiance 1000W/m², Module temperature 25℃, AM=1.5

Temperature and Coefficients

NOCT	48℃ ± 2℃	
Current temperature coefficient	%/K	0.06 ± 0.01
Voltage temperature coefficient	mV/K	-(155 ± 10)
Power temperature coefficient	%/K	-(0.5 ± 0.05)

NOCT: Nominal Operation Cell Temperature

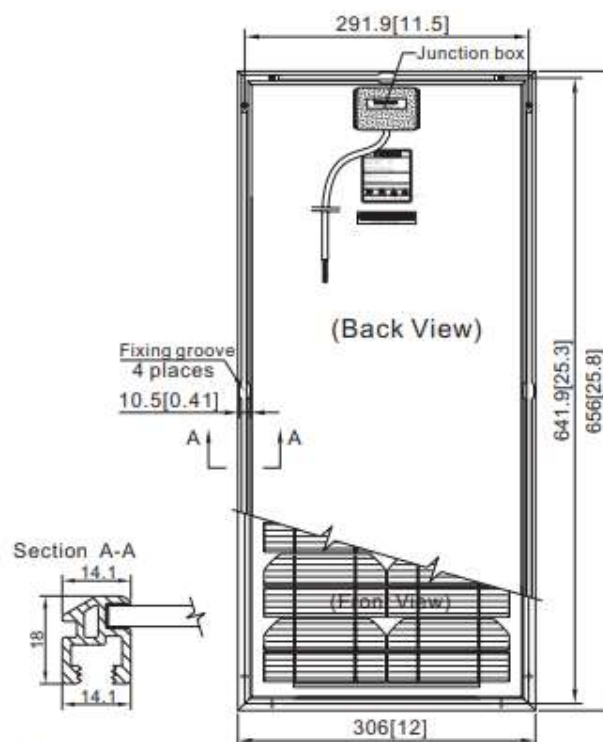
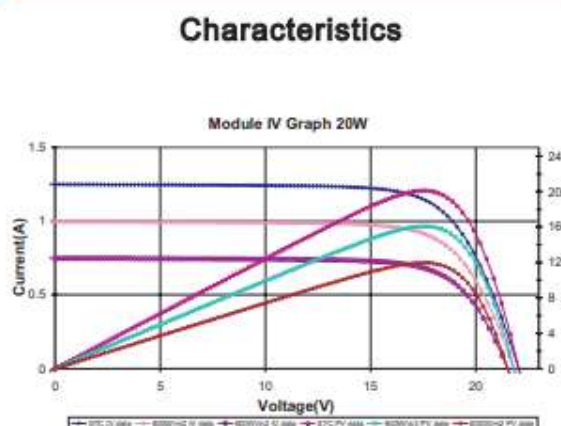
Output

Type of output terminal	Junction box
Cable	LAPP(4.0mm ²)
Connection	Suntech Plug Type IV

Certifications

IEC61215	TÜV class II
ISO9001:2000	CE

Blueprint of the module



www.suntech-power.com E-Mail:sales@suntech-power.com
17-6 Chang Jiang South Road, New District Wuxi, China 214028

APÊNDICE 1 – CONDICIONADOR DE SINAL PARA UM SENSOR DE IRRADIÂNCIA SOLAR

Condicionamento e Medição de Sinal com ótima precisão via Arduino

Observações importantes:

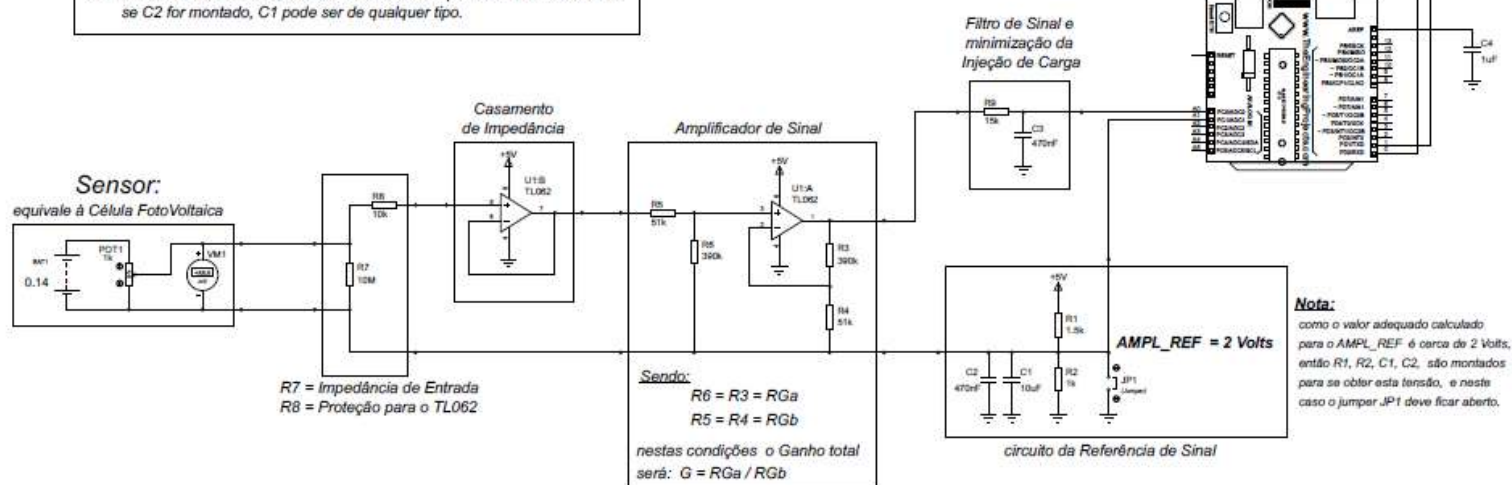
R3, R4, R5, R6, devem ser de 1%.

C4 deve ser do tipo Tântalo ou Cerâmico.

C3 deve ser do tipo Cerâmico.

C2 se montado, deve ser do tipo Cerâmico.

C1 : se C2 não for montado, então C1 deve ser do tipo Tântalo ou Cerâmico.
se C2 for montado, C1 pode ser de qualquer tipo.



para determinar o valor adequado para AMPL_REF, setado via R1 e R2:

- se o Sensor fornece apenas tensão positiva:

$$\text{valor adequado para AMPL_REF} = (V_{Ref_ADC} - \text{faixa de saída amplificada}) / 2$$

- se o Sensor fornece tensão positiva e negativa:

$$\text{valor adequado para AMPL_REF} = V_{Ref_ADC} / 2$$

onde: V_{Ref_ADC} = tensão de Referência para o Conversor AD do Arduino.

valor do AMPL_REF nesta aplicação:

nesta aplicação a "faixa de saída amplificada" é 1.1V, e o V_{Ref_ADC} utilizado é 5V (padrão do Arduino UNO).
Como o Sensor é uma Célula FotoVoltaica e fornece apenas tensões positivas, então o valor calculado para AMPL_REF será igual a 1.95V, e pode ser usado 2V sem prejuízo para a precisão ou faixa de sinal pois o código no Arduino irá compensar automaticamente.

APÊNDICE 2 – PROGRAMAÇÃO

<https://pastebin.com/dxvXLUqh>