

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**Maurilio de Lima Pereira**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO E  
DETECÇÃO DE FALHAS PARA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

**Maracanaú, Ceará**

**2018**

Maurilio de Lima Pereira

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO E DETECÇÃO  
DE FALHAS PARA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em energias renováveis. Área de concentração: Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. José Renato de Brito Sousa

Coorientador: Prof. Dr. Cláudio Marques de Sá Medeiros

Maracanaú, Ceará

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Instituto Federal do Ceará - IFCE  
Sistema de Bibliotecas - SIBI  
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- P436d    Pereira, Maurilio de Lima.  
          Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento e detecção de Falhas para Microgeração Fotovoltaica / Maurilio de Lima Pereira. - 2018.  
          128 f. : il.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Energias Renováveis, Campus Maracanaú, 2018.  
          Orientação: Prof. Dr. José Renato de Brito Sousa.  
          Coorientação: Prof. Dr. Cláudio Marques de Sá Medeiros.
1. Microgeração fotovoltaica. 2. Monitoramento. 3. Detecção de falhas. I. Título.
- CDD 620.91
-

MAURILIO DE LIMA PEREIRA

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO E DETECÇÃO  
DE FALHAS PARA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis, área de concentração Energias Renováveis.

Aprovada em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. José Renato de Brito Sousa (Orientador)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

---

Prof. Dr. Cláudio Marques de Sá Medeiros (Coorientador)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

---

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof. Dr. Elias Teodoro da Silva Júnior  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

*Dedico...*

*À minha família, meu bem mais precioso.*

# Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pelo dom da vida e por me permitir alcançar tantos sonhos nesta existência.

Aos meus pais, Manoel do Nascimento Pereira e Maria de Lima Feitosa Pereira, deixo um agradecimento especial por todo o amor, cuidado e incentivos que foram primordiais para a minha formação moral, acadêmica e profissional. Tenho orgulho e me sinto privilegiado pelos pais que Deus me presenteou.

Aos meus familiares, que apoiaram e compreenderam o meu distanciamento geográfico, tão necessário para alavancar o meu crescimento acadêmico.

À minha amada esposa Poliana Silva, por todo amor, carinho e cuidado a mim ofertados. Sua ajuda, conselhos e inteligência são sempre fundamentais para os meus sucessos.

Ao Instituto Federal do Ceará (IFCE) que, através do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) e do Laboratório de Processamento de Energia (LPE), tornaram possível este projeto de mestrado.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP, pelo aporte financeiro recebido durante o desenvolvimento deste projeto.

Ao meu orientador Prof. José Renato de Brito Sousa, pela disponibilidade e paciência em me guiar no desenvolvimento como pesquisador, os seus conhecimentos e experiências foram essenciais para o meu amadurecimento acadêmico. Agradeço também ao meu coorientador, Prof. Cláudio Sá, pelos inúmeros questionamentos e sugestões que foram de grande importância para alcançar os objetivos pretendidos por este trabalho. Obrigado por acreditarem em mim e tenho certeza que não chegaria neste ponto sem o apoio dos dois.

Aos professores Paulo Cesar Marques de Carvalho e Elias Teodoro Silva Júnior, pela disponibilidade em participar da banca examinadora e pelas valiosas contribuições.

Por fim, não poderia deixar de agradecer aos meus amigos do Laboratório de Processamento de Energia (LPE), que sempre estiveram disponíveis para ajudar e compartilhar experiências.

*“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”*  
*(Isaac Newton)*

# Resumo

Desde o ano de 2012, vem se observando uma crescente adoção de sistemas alternativos de geração elétrica pelos consumidores residenciais. Entre esses, o de microgeração fotovoltaica (FV) se destaca, pois apresenta, entre outras características, facilidade de montagem sobre telhados, robustez e fácil manutenção. Contudo, por ser um sistema que apresenta um custo de aquisição relativamente alto, necessita não apenas de um correto dimensionamento para que se atenda às necessidades energéticas dos consumidores, como também de se manter funcionando eficientemente. Entre os fatores que podem afetar seu correto funcionamento estão as falhas em componentes e a influencia de fatores ambientais, como sombreamento e acúmulo de sujeira sobre os módulos fotovoltaicos (MFVs). Em razão disso, a rápida identificação das falhas ou fatores ambientais prejudiciais ao seu correto funcionamento é primordial para que se mantenha uma máxima eficiência. Apesar de a maioria dos sistemas de geração possuírem inversores que já apresentam a função de monitoramento da geração, a opção de detecção de falhas ainda é pouco acessível ao microprodutor. Essas soluções são apresentadas por fabricantes especializados como serviços ou equipamento adicional e por serem soluções comerciais e, em sua maioria, inicialmente projetadas para sistemas de maior porte, a sua aquisição pode não ser considerada na instalação de pequenos sistemas. Baseado nesse contexto, objetivou-se desenvolver um sistema de monitoramento e detecção de falhas para microgeração FV capaz de detectar problemas como: desconexões de inversores e MFVs, sujeira e sombreamento e/ou defeitos em células dos MFVs. O sistema proposto faz uso da ferramenta de desenvolvimento baseada em fluxo para programação visual Node-RED e da linguagem Python, e funciona instalado em um minicomputador. O sistema de microgeração monitorado encontra-se no IFCE - Campus Fortaleza, e é composto por um conjunto de 8 MFVs conectados em série e um inversor *grid-tie* monofásico, totalizando uma potência de pico de 2.160 Wp. Para alimentar o sistema de monitoramento com dados, foram utilizadas placas microntroladas, responsáveis pela coleta de informações e conectadas ao minicomputador através de uma rede WLAN com acesso à internet. O sistema é capaz de coletar informações de irradiância solar, correntes e tensões de entrada e saída do inversor, temperaturas de funcionamento dos MFVs e das caixas de diodos de *bypass*. Os dados coletados serviram para o desenvolvimento de algoritmos capazes de detectar as falhas e condições ambientais especificadas anteriormente. Os dados obtidos com a simulação de falhas provocadas por sombreamento e sujeira, por sua vez, foram utilizados para treinamento do classificador *perceptron* multicamadas (MLP). Esse classificador detecta as condições de funcionamento normal, quatro níveis de sombreamento ou danos em MFVs e sujeira com 99,22% de precisão. Para a identificação de quais módulos apresentam defeitos ou sombreamento foi utilizada a análise da temperatura das caixas de diodos de *bypass*.

**Palavras-chaves:** Microgeração fotovoltaica; Monitoramento; Detecção de falhas.

# Abstract

Since 2012, there has been an increasing adoption of alternative systems of generation by residential consumers. Among these, the photovoltaic (PV) microgeneration stands out, as it presents, among other characteristics, ease of assembly on roofing, robustness and easy maintenance. However, as it is a system that has a cost relatively high acquisition costs, it needs not only a correct dimensioning for that meets the energy needs of consumers, but also to keep functioning efficiently. Among the factors that can affect its correct functioning there are component failures and the influence of environmental factors, such as shading and accumulation of dirt on the photovoltaic modules (PVM). That's why the rapid identification of failures or environmental factors that are detrimental to their correct functioning is essential to maintain maximum efficiency. Although most systems generation companies have inverters that already have the generation monitoring function, the failure detection option is still not accessible to the micro producer. These solutions are presented by specialized manufacturers as additional services or equipment and by commercial solutions and, for the most part, initially designed for larger systems size, its acquisition may not be considered in the installation of small systems. Based in this context, the objective was to develop a system for monitoring and fault detection for PV microgeneration capable of detecting problems such as: disconnection of inverters and PVM, dirt and shading and / or defects in PVM cells. The proposed system makes use of the flow-based development tool for visual programming Node-RED and the Python language, and works installed on on a minicomputer. The monitored microgeneration system is located at IFCE - Campus Fortaleza, and is composed of a set of 8 PVM connected in series and a single-phase grid-tie inverter, totaling a peak power of 2,160 Wp. To supply the monitoring system with data, microcontrolled plates were used, responsible for the collection of information and connected to the minicomputer through a WLAN network with internet access. The system is capable of collecting information on solar irradiance, currents and voltages from input and output of the inverter, operating temperatures of the PVM and bypass diodes. The collected data served for the development of algorithms capable of detecting the faults and environmental conditions specified previously. The data obtained with the simulation of failures caused by shading and dirt, in turn, were used for training the multilayer perceptron classifier (MLP). That classifier detects normal operating conditions, four levels of shading or damage to PVM and dirt with 99.22% accuracy. For the identification of which modules present defects or shading, the temperature analysis of the bypass diode boxes.

**Key-words:** Photovoltaic microgeneration; Monitoring; Fault detection.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Configuração básica de um SMGFV. . . . .	25
Figura 2 – Estrutura de uma célula FV convencional. . . . .	26
Figura 3 – Curvas características V - I (Tensão versus Corrente) de uma célula FV genérica para quatro níveis de irradiância a uma temperatura de célula constante. . . . .	26
Figura 4 – Curvas características P-V (potência versus tensão) de uma célula FV genérica para valores diferentes de temperatura de funcionamento e irradiância constante. . . . .	27
Figura 5 – Células FVs de silício monocristalino e policristalino. . . . .	27
Figura 6 – Ilustração esquemática de uma célula FV, de uma associação série de células e de um MFV. . . . .	28
Figura 7 – Partes constituintes do MFV típico. . . . .	28
Figura 8 – Exemplificação do funcionamento do diodo de <i>bypass</i> . . . . .	29
Figura 9 – Curvas de tensão versus corrente para variações de irradiância solar e temperatura de MFV policristalino, <i>CanadianSolar</i> , modelo CS6K-270P. . . . .	30
Figura 10 – Ilustração do funcionamento do inversor para SMGFV. . . . .	31
Figura 11 – Localização dos QPSs no sistema de microgeração. . . . .	32
Figura 12 – QPS CC e CA para SMGFV. . . . .	32
Figura 13 – Esquema elétrico de um QPS CC e CA para SMGFV. . . . .	33
Figura 14 – Página <i>web</i> oferecida pelo fabricante de inversores Fronius para o monitoramento do SMGFV. . . . .	34
Figura 15 – Sistema de geração, monitoramento e detecção de falhas oferecido pelo fabricante SOLAREEDGE. . . . .	35
Figura 16 – Diagrama de blocos de um sistema de monitoramento baseado em terra para SFVs. . . . .	37
Figura 17 – Identificação de parâmetros e os pontos de medições utilizados nos SMGFVs. . . . .	38
Figura 18 – Processo de digitalização de sinais analógicos por um DAQ. . . . .	38
Figura 19 – Representação do sistema de monitoramento desenvolvido por Han, Lee e Kim (2015). . . . .	40
Figura 20 – Representação do sistema de monitoramento desenvolvido por Pereira et al. (2018). . . . .	41
Figura 21 – Representação do sistema de monitoramento desenvolvido por Choi et al. (2017). . . . .	42
Figura 22 – Representação esquemática da rede neural proposta por Cristaldi, Leone e Vergura (2016). . . . .	43

Figura 23 – Disposição dos 8 MFVs sobre a caixa d’água do prédio. . . . .	46
Figura 24 – Disposição do inversor e de seus QPSs. . . . .	47
Figura 25 – Ilustração dos componentes utilizados no sistema de monitoramento e suas conexões. . . . .	49
Figura 26 – NodeMCU - ESP12E. . . . .	51
Figura 27 – Sensor do piranômetro construído. . . . .	52
Figura 28 – Componentes eletrônicos constituintes do piranômetro construído e suas conexões. . . . .	54
Figura 29 – Diagrama de dispersão dos dados coletados pelos dois equipamentos no dia 14 de setembro de 2018, das 05:00 às 19:00 horas. . . . .	55
Figura 30 – Irradiação solar global coletada no dia 14 de setembro de 2018 pelos piranômetros próprio e KIMO/SL-200. . . . .	55
Figura 31 – Irradiação solar global coletada no dia 14 de setembro de 2018, pelos piranômetros próprio e KIMO/SL-200, no período de maior nebulosidade. . . . .	56
Figura 32 – Irradiação solar global coletada no dia 14 de setembro de 2018 pelos piranômetros próprio e KIMO/SL-200, no período de 09:00 h às 14:00 h . . . . .	56
Figura 33 – Irradiação solar global coletada no dia 14 de setembro de 2018 pelos piranômetros próprio e KIMO/SL-200, no período de 15:00 h às 19:00 h . . . . .	57
Figura 34 – Gráfico de erros de medição do piranômetro LED em relação ao KIMO/SL-200. . . . .	58
Figura 35 – Gráfico de erros de medição do piranômetro LED em relação ao KIMO/SL-200 em valores percentuais. . . . .	58
Figura 36 – Ilustração dos componentes e fluxo de informações na placa de aquisição de dados de tensões e correntes. . . . .	60
Figura 37 – Sensor ACS712 . . . . .	60
Figura 38 – Sensor de tensão contínua . . . . .	61
Figura 39 – Curva de resposta do circuito proposto. . . . .	62
Figura 40 – Curva utilizada para a obtenção da equação do cálculo da tensão de entrada. . . . .	62
Figura 41 – Sensor de tensão alternada . . . . .	63
Figura 42 – Termistor NTC fixado na face traseira de um dos MFVs do SMGFV monitorado. . . . .	64
Figura 43 – Termistor NTC fixado na caixa de diodos de <i>bypass</i> de um dos MFVs do SMGFV monitorado. . . . .	64
Figura 44 – Raspberry Pi 3, modelo B . . . . .	66
Figura 45 – Imagem ilustrativa da rede criada e dos componentes conectados . . . . .	68
Figura 46 – Comunicação entre os dispositivos integrantes da rede através do protocolo MQTT. . . . .	69

Figura 47 – Visualização do editor do Node-RED sendo executado em um navegador <i>web</i> . . . . .	70
Figura 48 – Visualização de uma aplicação desenvolvida através do Node-RED. . . . .	70
Figura 49 – Telas de um <i>smartphone</i> aberto no grupo criado e de uma conversa privada com o <i>ChatBot</i> . . . . .	72
Figura 50 – Sombreamento de algumas células de um MFV do SMGFV para gerar um falha tipo F03-2. . . . .	75
Figura 51 – Falha F03-4 causada pelo sombreamento de vários MFVs simultaneamente. . . . .	75
Figura 52 – Falha F04 gerada artificialmente. . . . .	76
Figura 53 – Fluxograma - Detecção de falhas de desconexão dos MFVs. . . . .	76
Figura 54 – Fluxograma - Detecção de falhas de desconexão do inversor da rede elétrica. . . . .	77
Figura 55 – Fluxograma - Detecção de falhas de desconexão das placas de coleta de dados. . . . .	78
Figura 56 – Ilustração da rede <i>Perceptron</i> . . . . .	79
Figura 57 – Ilustração de uma rede PMC com duas camadas intermediárias. . . . .	80
Figura 58 – Ilustração da rede <i>Perceptron</i> utilizada neste trabalho quando configurada para classificar seis classes. . . . .	81
Figura 59 – Topologia da rede neural PMC utilizada neste projeto. . . . .	81
Figura 60 – Fluxograma do funcionamento do <i>script</i> do detector de falhas. . . . .	83
Figura 61 – Visualização do arquivo dados.txt, através do programa <i>LibreOffice Calc</i> . . . . .	85
Figura 62 – Solicitação de um usuário ao bot AVA. . . . .	85
Figura 63 – Notificação de alerta visível através da interface local. . . . .	86
Figura 64 – Notificações enviadas pelo bot AVA . . . . .	87
Figura 65 – Gráficos <i>box plots</i> da faixa de alcance dos valores de cada parâmetro. . . . .	89
Figura 66 – Histogramas contendo a faixa de alcance dos valores de cada parâmetro. . . . .	90
Figura 67 – Esquema eletrônico da interligação entre o NodeMCU, o CI4051 e as saídas dos sensores . . . . .	106
Figura 68 – Esquema eletrônico da placa de aquisição de temperaturas dos módulos. . . . .	108
Figura 69 – Tela HOME da interface gráfica local. . . . .	110
Figura 70 – Visualização do MENU do sistema de monitoramento. . . . .	110
Figura 71 – Tela PIRANÔMETRO da interface gráfica local. . . . .	111
Figura 72 – Tela SISTEMA 01 da interface gráfica local. . . . .	111
Figura 73 – Gráfico da potência gerada visível na tela SISTEMA 01 da interface gráfica local. . . . .	112
Figura 74 – Funcionamento normal - 18/07/2018 das 05:46h às 15:19h . . . . .	113
Figura 75 – Funcionamento com falha F03-1 - 20/07/2018 das 05:50h às 15:19h . . . . .	114
Figura 76 – Funcionamento com falha F03-2 - 25/07/2018 das 05:45h às 15:19h . . . . .	114
Figura 77 – Funcionamento com falha F03-3 - 31/07/2018 das 05:50h às 15:19h. . . . .	115

Figura 78 – Funcionamento com falha F03-4 - 15/07/2018 das 15:25h às 17:24h. . .	115
Figura 79 – Funcionamento com falha F03-4 - 16/07/2018 das 15:25h às 17:24h. . .	116
Figura 80 – Funcionamento com falha F03-4 - 17/07/2018 das 15:25h às 17:24h. . .	116
Figura 81 – Funcionamento com falha F03-4 - 18/07/2018 das 15:25h às 17:24h. . .	117
Figura 82 – Funcionamento com falha F03-4 - 19/07/2018 das 05:55h às 15:19h. . .	117

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Módulo Canadian Solar-CS6K-270P . . . . .	47
Tabela 2 – Características elétricas do inversor Fronius Primo 3.0 . . . . .	48
Tabela 3 – Visualização parcial dos dados contidos no arquivo utilizado no desenvolvimento da rede PMC . . . . .	89
Tabela 4 – Quantidade de amostras por classe. . . . .	89
Tabela 5 – Resumo dos campos numéricos dos dados de irradiância solar e corrente contínua. . . . .	89
Tabela 6 – Taxas de acerto das redes <i>Perceptron</i> . . . . .	90
Tabela 7 – Matriz de confusão da classificação em dados normais e falhas, através da rede <i>Perceptron</i> . . . . .	91
Tabela 8 – Matriz de confusão da classificação em dados normais e falhas F03-1, através de rede <i>Perceptron</i> . . . . .	91
Tabela 9 – Matriz de confusão da classificação em dados normais e falhas do tipo F04, através de rede <i>Perceptron</i> . . . . .	92
Tabela 10 – Matriz de confusão da classificação em seis classes distintas através da rede <i>Perceptron</i> com seis neurônios de saída. . . . .	92
Tabela 11 – Taxas de acertos obtidas pelas redes PMC, em que foram experimentadas quantidades diferentes de neurônios na camada intermediária. . . . .	93
Tabela 12 – Matriz de confusão da rede PMC com 30 neurônios na camada intermediária. . . . .	94
Tabela 13 – Comparação das taxas de acerto entre redes PMC de uma e duas camadas intermediárias. . . . .	95
Tabela 14 – Componentes utilizados . . . . .	104
Tabela 15 – Componentes utilizados . . . . .	105
Tabela 16 – Componentes utilizados na confecção da placa . . . . .	107

# Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AM	<i>Air Mass</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
API	<i>Application Programming Interface</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
EVA	Etil, Vinil e Acetato
FV	Fotovoltaica
GD	Geração Distribuída
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
IoT	<i>Internet of Things</i>
MAGE	Incerteza associada a cada única medida
MFV	Módulo Fotovoltaico
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
MW	Megawatt
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
PLC	<i>Power Line communication</i>
PMC	<i>Perceptron Multicamadas</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QPS	Quadros de Proteção e Seccionamento
RPi	Raspberry Pi

SFV	Sistema Fotovoltaico
SMGFV	Sistema de Microgeração Fotovoltaica
SoC	<i>System on a Chip</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
VNC	<i>Virtual Network Computing</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	Justificativa	20
1.2	Objetivos	21
1.2.1	Objetivos específicos	21
1.3	Produção	21
1.4	Organização do texto	21
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>23</b>
2.1	Sistema de microgeração distribuída FV	23
2.1.1	Geração distribuída	23
2.1.2	Microgeração distribuída FV	24
2.1.3	Componentes	25
2.1.3.1	Módulos fotovoltaicos	25
2.1.3.2	Inversor	30
2.1.3.3	Quadros de proteções e seccionamento	31
2.1.3.4	Monitoramento e supervisão	33
2.1.4	Defeitos e Falhas	34
2.2	Sistemas de monitoramento para geração fotovoltaica	36
2.3	Propostas de sistemas de monitoramento e detecção de falhas em SMGFV	39
2.4	Tecnologias utilizadas para o desenvolvimento do sistema proposto	43
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>46</b>
3.1	Sistema de microgeração	46
3.2	Equipamentos para coleta, transmissão, armazenamento, processamento e visualização dos dados	48
3.2.1	Coleta de dados	50
3.2.1.1	NodeMCU ESP-12E	50
3.2.1.2	Coleta de informações de irradiância solar	52
3.2.1.3	Coleta de informações de tensão e corrente	59
3.2.1.4	Coleta de informações de temperatura dos MFVs	63
3.2.2	Computação - Raspberry Pi	65
3.2.3	Rede de comunicação	67
3.3	Sistema de monitoramento e detecção de falhas	68
3.3.1	Monitoramento	69

3.3.2	Detecção de falhas . . . . .	72
3.3.2.1	Falhas e condições de funcionamento que podem afetar a eficiência do SMGFV. . . . .	73
3.3.2.2	Algoritmos . . . . .	74
3.3.2.3	Rede neural . . . . .	78
3.3.2.4	<i>Script</i> detector/identificador de falhas relacionadas aos MFVs . . . . .	82
<b>4</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>84</b>
<b>4.1</b>	<b>Monitoramento . . . . .</b>	<b>84</b>
4.1.1	Armazenamento e processamento dos dados . . . . .	84
4.1.2	Notificações . . . . .	86
<b>4.2</b>	<b>Detecção de falhas . . . . .</b>	<b>87</b>
4.2.1	Análise do dados utilizados . . . . .	87
4.2.2	Rede neural . . . . .	90
4.2.2.1	Rede <i>Perceptron</i> . . . . .	90
4.2.2.2	Rede PMC . . . . .	93
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>96</b>
5.1	Trabalhos futuros . . . . .	98
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>99</b>
	 <b>APÊNDICES . . . . .</b>	 <b>103</b>
	<b>APÊNDICE A – DESENVOLVIMENTO DO PIRANÔMETRO</b>	<b>104</b>
A.1	Componentes utilizados . . . . .	104
A.2	Algoritmo desenvolvido no OCTAVE para visualização e comparação dos dados coletados . . . . .	104
	<b>APÊNDICE B – DESENVOLVIMENTO DA PLACA DE COLETA DE INFORMAÇÕES DE CORRENTES E TENSÕES . . . . .</b>	<b>105</b>
B.1	Componentes utilizados . . . . .	105
B.2	Esquema eletrônico da placa . . . . .	105
B.3	Algoritmo desenvolvido na Arduino IDE e gravado no NodeMCU	105
	<b>APÊNDICE C – PLACA DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURAS . . . . .</b>	<b>107</b>
C.1	Componentes utilizados . . . . .	107
C.2	Esquema eletrônico da placa . . . . .	107
C.3	Algoritmo desenvolvido na Arduino IDE e gravado no NodeMCU	108

	<b>APÊNDICE D – SISTEMA DE MONITORAMENTO E DETECÇÃO DE FALHAS DESENVOLVIDO ATRAVÉS DO NODE-RED . . . . .</b>	<b>109</b>
D.0.1	Interfaces . . . . .	109
	<b>APÊNDICE E – VISUALIZAÇÃO DE DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR . . . . .</b>	<b>113</b>
E.1	Dados de funcionamento normal . . . . .	113
E.2	Dados de funcionamento com falhas do tipo F03 níveis 1, 2 e 3	114
E.3	Dados de funcionamento com falhas do tipo F03-4 . . . . .	115
E.4	Dados de funcionamento com falhas do tipo F04 . . . . .	117
	<b>APÊNDICE F – CLASSIFICADORES, <i>SCRIPT</i> DETECTOR DE FALHAS E CONJUNTO DE DADOS .</b>	<b>118</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>119</b>
	<b>ANEXO A – <i>DATA SHEET</i> DO FOTODIODO TSAL6200 .</b>	<b>120</b>
	<b>ANEXO B – <i>DATA SHEET</i> DO PIRANÔMETRO KIMO SL200126</b>	

# 1 Introdução

A partir dos dados disponibilizados por [EPE \(2017\)](#) é possível verificar um crescente consumo de energia elétrica no Brasil a partir de 1970 até o ano de 2017. Nesse período, a demanda por energia saltou de cerca de 39 GWh, em 1970, para mais de 526 GWh, no ano de 2017. Pode-se ver ainda, que o crescimento no consumo de energia elétrica nos últimos dez anos equivale a aproximadamente 23,5 %. Esse crescente consumo aliado aos recorrentes aumentos nos valores das tarifas de energia elétrica, questões ambientais e de sustentabilidade suscitam análise e até uma mudança na política atual de geração de eletricidade.

Em [EPE \(2018\)](#) pode-se observar que, no ano de 2017, o Brasil apresentou oferta de energia elétrica suficiente para suprir sua demanda, além de apresentar uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, com uma participação de 81,7 % de fontes renováveis. No entanto podemos observar ainda, que essa geração depende principalmente do potencial hidráulico, que representa 68,1 % da oferta interna de energia elétrica. O restante da demanda brasileira é suprida por energia proveniente de fontes como: biomassa, gás natural, eólicas, carvão, derivados do petróleo, nuclear e solar.

Em virtude do aumento no risco de déficit de energia no país, em parte devido à distribuição irregular de chuvas no nosso país e os baixos índices pluviométricos registrados, entre os anos de 2014 a 2017, nas cabeceiras dos rios que abastecem as principais hidroelétricas, essa forte dependência do potencial hidráulico tornou-se uma questão preocupante. [EBC \(2017\)](#) afirma que apesar de a situação das hidroelétricas ter melhorado um pouco no final do ano de 2017, com a chegada das chuvas do período, os níveis dos principais reservatórios continuam críticos em relação aos níveis históricos de armazenamento de água. Essa situação é sentida pelos consumidores, através dos recorrentes aumentos das tarifas de energia elétrica, justificados pelo fato de que as termoeletricas, que deveriam ser acionadas apenas em casos emergenciais, tiveram sua participação ampliada.

A elevação do custo da energia elétrica pode ser citada como um dos motivos do crescente desejo dos consumidores de terem um sistema de geração próprio. Ideia fortalecida pela publicação da Resolução Normativa N° 482, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no ano de 2012, que regulamenta a geração de energia elétrica pelo consumidor. [Castro \(2015\)](#) afirma que após a publicação dessa resolução se iniciou um processo de difusão da micro e minigeração elétrica no Brasil, e que no ano de 2015 os Sistemas Fotovoltaicos (SFVs) já representavam cerca de 90 % dos sistemas de microgeração instalados. O autor afirma também que, nesse mesmo ano, 87 % desses sistemas eram adotados por consumidores residenciais e comerciais e que dentre essas instalações, cerca

de 73 % possuíam potência instalada de até 5 kW.

De acordo com [EPE \(2018\)](#), no ano de 2017 a geração elétrica através da micro e minigeração distribuída atingiu 359,1 GWh, com uma potência instalada de 246,1 MW. O destaque fica para a fonte solar Fotovoltaica (FV), com 53,6 GWh e 174,5 MW de geração e potência instalada respectivamente.

Com base nas informações que são apresentadas por [EPE \(2018\)](#) e [Castro \(2015\)](#) é possível afirmar que a geração FV é a forma mais adotada para micro e minigeração. Entretanto, apesar de que os custos de aquisição desses sistemas venham caindo ano após ano, ainda é considerado elevado. Aliado a isso, temos a interação entre o custo de aquisição e as condições de funcionamento desses sistemas, o que pode afetar fortemente o tempo de retorno do investimento. É interessante então, que os SFVs funcionem corretamente e eficientemente para que esse tempo de retorno seja reduzido. [CRESESB \(2014\)](#) afirma que é desejável a utilização de sistemas de monitoramento na geração FV para se registrar dados e identificar rapidamente falhas que podem comprometer o correto funcionamento. Porém, [CRESESB \(2014\)](#) também adverte que antes de se adquirir e instalar um sistema de monitoramento, deve-se levar em conta a relação benefício-custo, pois dependendo da complexidade e tamanho, monitorar o sistema pode ser inviável financeiramente.

Neste contexto, este projeto propõe o desenvolvimento de um sistema de monitoramento e identificação de falhas para Sistemas de Microgeração Fotovoltaica (SMGFV). Sistema esse, que deve permitir o acompanhamento e armazenamento local e remoto dos principais parâmetros relacionados à geração.

## 1.1 Justificativa

Apesar da elevada confiabilidade, os SMGFVs estão sujeitos à falhas e condições de funcionamentos que podem comprometer o seu desempenho, aumentando perdas na geração. Por esse motivo é importante investir em tecnologias capazes de acompanhar dados relacionados ao SMGFV tais como tensões, correntes, potências, irradiância e temperaturas dos Módulos Fotovoltaicos (MFVs), no intuito de identificar rapidamente as eventuais falhas. [CRESESB \(2014\)](#) afirma que alguns SFVs já possuem componentes capazes de adquirir e monitorar dados da geração, no entanto, [Halmeman \(2014\)](#) afirma que as tecnologias utilizadas pertencem aos fabricantes, o que pode elevar os custos e dificultar o acesso dos pequenos consumidores a esses sistemas.

Na ausência de componentes que já possuam a capacidade de monitoramento ou detecção das falhas é recomendado o uso de equipamentos adicionais para a realização dessas funções. Em vista disso, é importante projetar um sistema de monitoramento ou detecção das falhas confiável, de baixo custo relativo, modular e de código aberto que possa executar essa finalidade.

## 1.2 Objetivos

Desenvolver um sistema para monitoramento e detecção de falhas capaz de identificar a ocorrência de sombreamento e/ou danos e sujidade em MFVs pertencentes a SMGFVs, utilizando para isso *hardwares* com comunicação sem fio, *software* livre e aplicativo de mensagens em nuvem.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Utilizar sistemas microcontrolados para coletar dados relacionados ao funcionamento do sistema de microgeração FV;
- Desenvolver um script para microcomputador que possa processar e armazenar os dados coletados;
- Desenvolver uma interface gráfica para acompanhamento local e remoto do funcionamento do sistema de geração;
- Armazenar os dados coletados em *backup* local e em nuvem para possibilitar futuras consultas;
- Desenvolver scripts capazes de detectarem falhas de desconexão do inversor e dos MFVs, além de identificar a ocorrência de sombreamento e/ou danos e sujidade nos MFVs.

## 1.3 Produção

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, o seguinte trabalho científico foi publicado:

PEREIRA, M. L; SOUSA, J. R. B. Monitoring Systems Used In Photovoltaic Microgeneration: A Review. IEEE Latin America Transactions, v. 15, n. 9, p. 1671-1676, 2017.

## 1.4 Organização do texto

Este documento está estruturado da seguinte forma: No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica, onde são vistos conceitos como geração distribuída, micro e minigeração, dando ênfase à microgeração fotovoltaica; acrescentando-se na sequência informações sobre sistemas de monitoramento e, por fim, são descritos alguns trabalhos referentes ao assunto. No Capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados para

realização do projeto. No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos e, finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Fundamentos Teóricos

No presente capítulo é apresentada inicialmente a definição de sistemas de microgeração distribuída FV, seus componentes e as principais falhas que podem surgir nos mesmos. Em seguida é realizada uma explanação sobre sistemas de monitoramento, detalhando os componentes e técnicas utilizadas. Por fim, são apresentados alguns trabalhos recentes, encontrados na literaturas, que tratam dos temas mencionados acima.

### 2.1 Sistema de microgeração distribuída FV

Antes de explanar sobre microgeração FV, é importante definir o conceito de geração distribuída e apresentar alguns pontos da Resolução Normativa que trata desse tema.

#### 2.1.1 Geração distribuída

Segundo [INEE \(2018\)](#), Geração Distribuída (GD) é uma expressão usada para designar a geração elétrica realizada junto ou próxima do(s) consumidor(es) independente da potência, tecnologia e fonte de energia.

Em relação à geração centralizada, [INEE \(2018\)](#) afirma que a GD apresenta como vantagens, a economia de investimentos em linhas de transmissão, redução das perdas e melhoria da estabilidade do serviço de energia elétrica. Como desvantagem é possível mencionar, por exemplo, o aumento na complexidade de operação da rede de distribuição, pois através da mesma irá transitar um fluxo bidirecional de energia elétrica.

A Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, alterada pela Resolução Normativa nº 687/2015, divide essa modalidade de geração em micro e minigeração distribuída. Essa Resolução estabelece também as condições gerais para o acesso desses modelos de gerações junto à rede de distribuição elétrica e dá outras providências.

De acordo com a resolução citada, microgeração distribuída é definida como a central geradora de energia elétrica que possui potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utiliza cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica. Além disso, essa central deve estar conectada à rede de distribuição por meio da instalação elétrica da própria unidade consumidora.

Minigeração distribuída, por sua vez, é definida como a central geradora de energia elétrica que possui potência instalada superior a 75 kW e menor a 3 MW, quando composta por fontes híbridas. No caso de ser composta por cogeração qualificada ou demais fontes

renováveis, sua potência instalada deve ficar compreendida entre 75 kW e 5 MW. Da mesma forma que a microgeração, esse tipo de central deve estar conectada à rede de distribuição por meio da instalação da própria unidade consumidora. Ressaltando que, através da Resolução Normativa nº235/2006, a ANEEL define cogeração qualificada como processo operado numa instalação específica para fins da produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária.

A Resolução Normativa nº 482/2012 regulamenta também a energia ativa excedente injetada no sistema de distribuição pela unidade consumidora. Segundo a mesma, essa energia será cedida a título de empréstimo gratuito para a distribuidora de energia, ficando o consumidor com um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de até 60 (sessenta) meses. Para o registo da energia ativa entregue à rede de distribuição, a ANEEL (2017) estabelece que deve ser utilizado um medidor que possua a funcionalidade de medição bidirecional.

Na microgeração, a distribuidora de energia tem a responsabilidade técnica e financeira pelo sistema de medição, enquanto na minigeração os custos provenientes da adequação do sistema de medição são de responsabilidade do interessado.

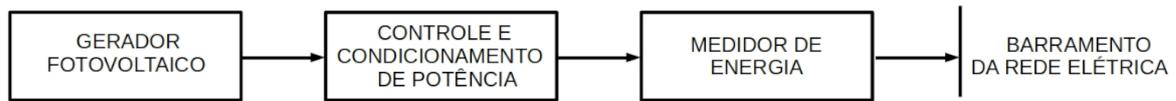
### 2.1.2 Microgeração distribuída FV

O SMGFV é a modalidade que realiza a conversão direta da irradiação solar em energia elétrica. Segundo CRESESB (2014), esse sistema dispensa a utilização de acumuladores de energia, pois toda energia convertida é consumida pela carga ou é entregue à rede de distribuição, funcionando assim, como uma fonte complementar ao sistema elétrico em que está conectado.

Segundo Villalva e Gazoli (2012), na maioria das vezes, os SMGFVs estão dispostos em telhados de residências, empresas, prédios comerciais e qualquer outro tipo de consumidor, suprimindo o consumo de eletricidade de forma total ou parcial. Os autores afirmam ainda que esses sistemas são fáceis de instalar, exigindo apenas alguns requisitos de proteção e utilizam poucos componentes. Sua estrutura é modular e pode ser acrescentada qualquer quantidade em paralelo, a depender das necessidades do consumidor.

Na Figura 1 é representada, de forma esquemática, a configuração básica de um SMGFV. Nota-se que o gerador FV entrega a energia a um bloco de controle e condicionamento de potência. Na sequência, a energia convertida passa pelo bloco medidor, sendo finalmente entregue à rede de energia elétrica onde o sistema está conectado.

Figura 1 – Configuração básica de um SMGFV.



Fonte: Autoria Própria

CRESESB (2014) cita o MFV e o inversor como principais componentes de um sistema de microgeração, sendo opcional a utilização de equipamentos de monitoramento e supervisão. Para a proteção e seccionamento do circuito elétrico são previstos a utilização de quadros de proteção e seccionamento (QPSs) para corrente alternada (CA) e corrente contínua (CC). Esses componentes são descritos detalhadamente na subsecção seguinte.

### 2.1.3 Componentes

Nessa subsecção são descritos os principais componentes de um SMGFV, que são: módulos fotovoltaicos (MFVs), inversor, QPSs, além de equipamentos de monitoramento e supervisão.

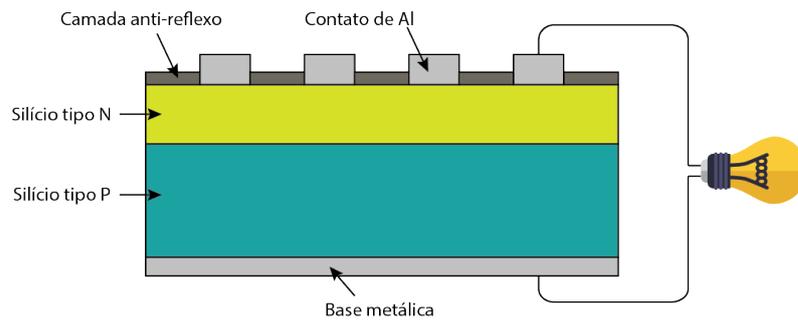
#### 2.1.3.1 Módulos fotovoltaicos

Segundo Messenger e Ventre (2010), os SFVs são desenvolvidos em torno de células FVs, sendo que uma célula em funcionamento produz, tipicamente, menos de 5 W de potência e cerca de 0,5 V de tensão contínua. Para que seja possível contornar essas limitações e se obter maiores valores de potência e tensão, são conectadas várias células em configuração série e/ou paralelo, a depender da necessidade. Através desse artifício é possível construir MFV, também nomeados de painéis FVs, de pequenos valores de potência até mais de 300 W.

Luque e Hegedus (2003) afirmam que uma célula FV é simplesmente um diodo semicondutor que foi cuidadosamente projetado e construído de forma eficiente para absorver e converter a energia da luz do sol em energia elétrica.

A estrutura de uma célula FV convencional é representada na Figura 2, onde é apresentado um material semicondutor que possui duas camadas, uma do tipo N e outra do tipo P. Na face inferior há um base metálica em contato com a camada do tipo P e na superior há uma grade metálica em contato com a camada do tipo N e uma camada anti-reflexo, que tem como finalidade potencializar a absorção da luz solar pela célula. É possível visualizar também, uma carga com seus terminais conectados na base e na grade metálica da célula, consumindo a corrente gerada.

Figura 2 – Estrutura de uma célula FV convencional.



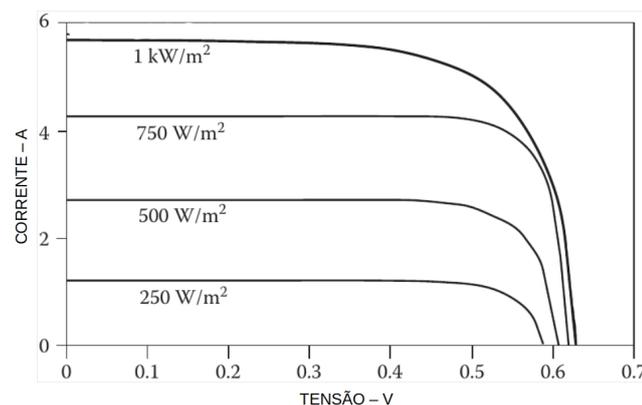
Fonte: [Sharenergy \(2018\)](#).

De acordo com [CRESESB \(2014\)](#), quando a célula FV é exposta a luz ocorre a fotogeração de pares de elétron-lacuna no seu interior, surgindo uma corrente elétrica através da junção P-N. Essa corrente é formada por elétrons que migram do material tipo P para o tipo N e lacunas que fazem o processo inverso. Caso seja conectado um condutor ou carga elétrica entres a base metálica e a grade, haverá circulação de uma corrente elétrica.

[Messenger e Ventre \(2010\)](#) afirmam que a potência gerada por uma célula FV é dependente da intensidade luminosa aplicada a mesma e de sua temperatura de funcionamento. Sendo que o aumento da intensidade luminosa sobre a célula tende a elevar a corrente gerada, enquanto o aumento da temperatura tende a reduzir a tensão em seus terminais.

Para demonstrar o comportamento da célula FV em razão do nível de irradiância solar aplicada a mesma, são apresentadas na Figura 3 as curvas características V - I (tensão versus corrente) de uma célula genérica para quatro níveis de irradiância a uma temperatura de célula constante. Sendo possível notar, que quanto maior o nível de irradiância sobre a célula FV, maior o nível de corrente elétrica gerada.

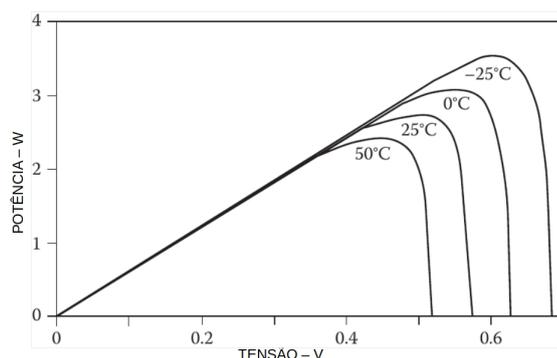
Figura 3 – Curvas características V - I (Tensão versus Corrente) de uma célula FV genérica para quatro níveis de irradiância a uma temperatura de célula constante.



Fonte: Adaptado de [Messenger e Ventre \(2010\)](#).

Na Figura 4 são apresentadas as curvas características P-V (potência versus tensão) de uma célula FV genérica em razão de sua temperatura de funcionamento para um mesmo nível de irradiância. Pode-se ver o comportamento da célula para quatro valores de temperatura de funcionamento a uma nível de irradiância constante. Ao analisar o gráfico é possível notar, que o aumento da temperatura reduz a tensão de saída da célula e consequentemente a potência gerada.

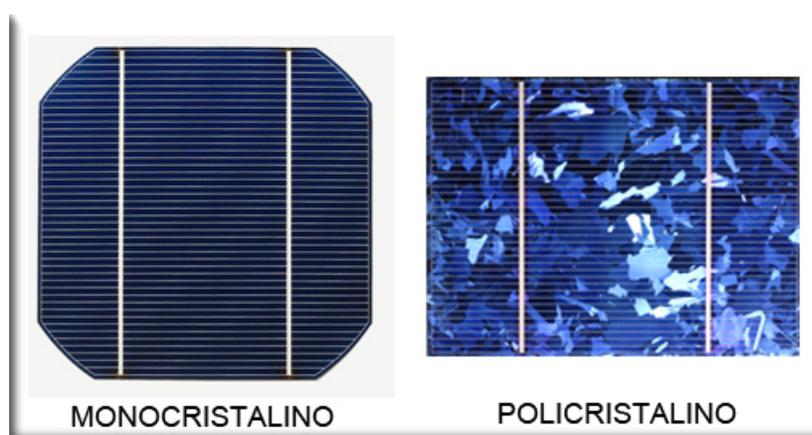
Figura 4 – Curvas características P-V (potência versus tensão) de uma célula FV genérica para valores diferentes de temperatura de funcionamento e irradiância constante.



Fonte: Adaptado de [Messenger e Ventre \(2010\)](#).

Segundo [CRESESB \(2014\)](#), entre as várias tecnologias de construção de células FVs, as fabricadas em silício monocristalino e policristalino são as mais difundidas no mercado. Atualmente essas células apresentam uma eficiência que varia entre 14,5 % a 16,5 %. Esse dois tipos de células podem ser vistas na Figura 5.

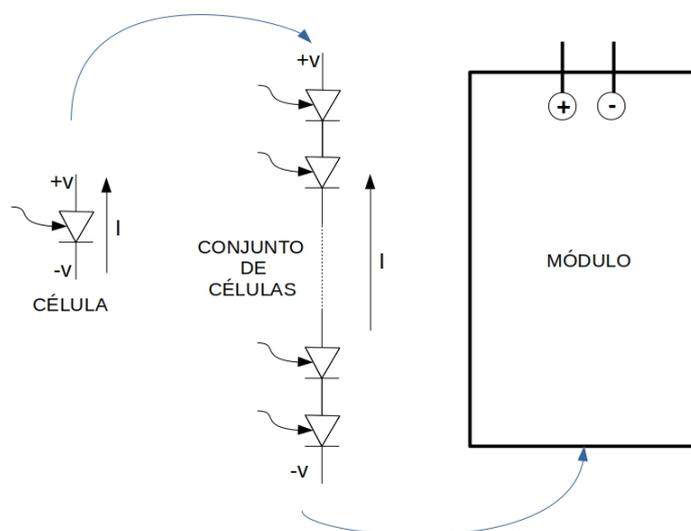
Figura 5 – Células FVs de silício monocristalino e policristalino.



Fonte: [SOLAR-ENERGIA \(2018\)](#).

Na Figura 6 é representada, de forma esquemática, a integração de células FVs para construção de um MFV. Nela são apresentadas a célula FV, simbolizada por um diodo sensível à energia luminosa, uma associação série dessas células para se obter um maior valor de tensão e, por fim, uma representação de um MFV.

Figura 6 – Ilustração esquemática de uma célula FV, de uma associação série de células e de um MFV.

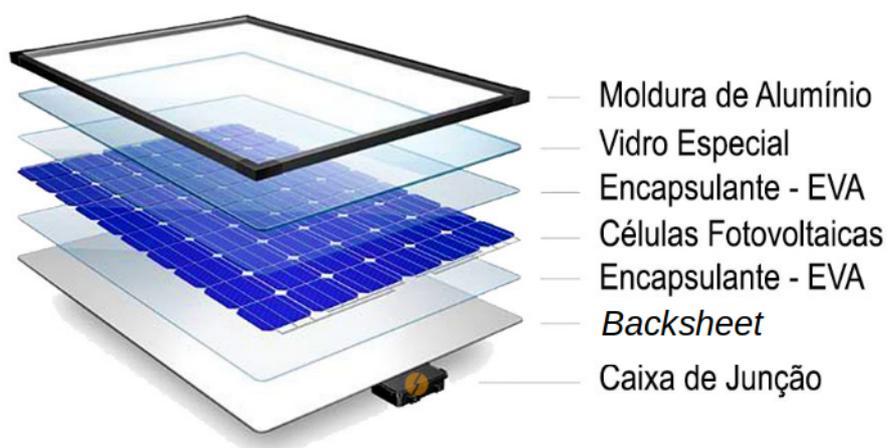


Fonte: Adaptado de [Messenger e Ventre \(2010\)](#).

[Messenger e Ventre \(2010\)](#) afirmam que quando as células são associadas para formar módulos, frequentemente são recobertas com revestimentos anti reflexível e materiais especiais laminados. O material anti reflexível tem a função de potencializar a absorção de luz e o material laminado de evitar a degradação de seus contatos elétricos. Uma moldura metálica e um vidro especial são também utilizados para se conseguir uma resistência mecânica do módulo.

Na Figura 7 são apresentadas as partes constituintes de um MFV típico. Nota-se que o módulo é formado por uma moldura de alumínio, um vidro especial, duas folhas de Etil, Vinil e Acetato (EVA), utilizadas para o encapsulamento do conjunto de células, um material opaco chamado *backsheet* e uma caixa de junção.

Figura 7 – Partes constituintes do MFV típico.



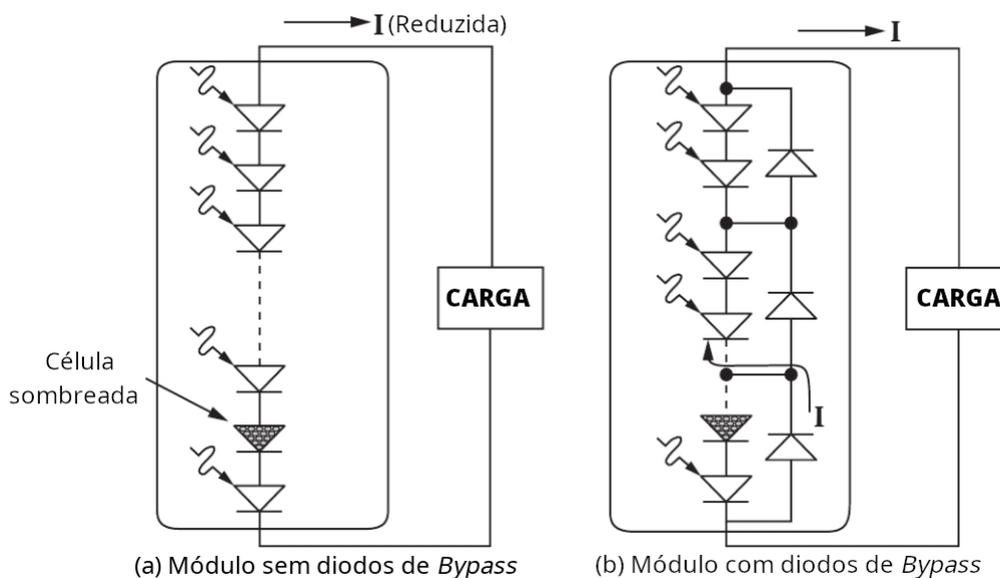
Fonte: [SOLAR \(2018\)](#).

Na caixa de junção estão alojados os diodos de *bypass* e a essa caixa estão acoplados um par de cabos e conectores utilizados para a interconexão dos MFV.

Segundo CRESESB (2014), os diodos de *bypass* tem a função de evitar pontos quentes no módulo em caso de sombreamento ou defeito de uma ou mais células. Esses diodos são conectados em paralelo, mas com polaridade invertida em relação à polaridade das células do módulo. Há um diodo para cada conjunto de células em série, caso uma célula apresente defeito, a corrente que passaria pelo conjunto de células protegidas é desviado através dele.

Na Figura 8 pode-se visualizar dois MFVs formados pela associação em série de várias células. Na representação são sinalizadas duas células como sombreadas. Na Figura 8(a) a corrente gerada é reduzida, visto que a célula sombreada dificulta o fluxo de corrente, enquanto que na Figura 8(b) a corrente gerada flui através do diodo de *bypass*, contornando a célula afetada.

Figura 8 – Exemplificação do funcionamento do diodo de *bypass*.



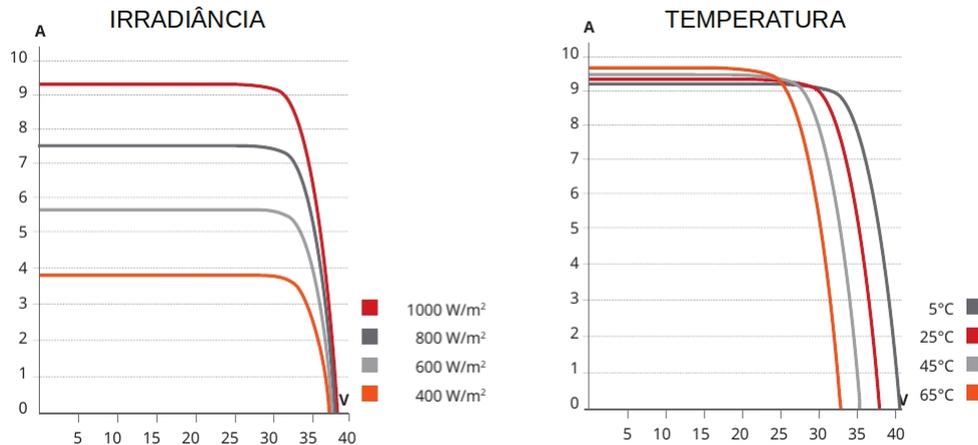
Fonte: Adaptado de Messenger e Ventre (2010).

Quando em funcionamento, o módulo tem um comportamento análogo ao de uma célula FV, podendo ser conectado a outros em ligação série e/ou paralelo. Um conjunto de MFVs conectados em série é nomeado na literatura como *string* e o conjunto de *strings* conectados em paralelo chama-se *array*.

O comportamento de um MFV para diferentes níveis de irradiância solar e temperaturas reflete o comportamento do conjunto de células FVs que o compõe. Na Figura 9 são apresentadas as curvas de tensão versus corrente, para variações de irradiância e temperatura de um MFV policristalino de 270 W do fabricante *CanadianSolar* e modelo CS6K-270P. No gráfico à esquerda é apresentada a resposta do MFV a quatro níveis de

irradiância solar a uma temperatura de 25 °C (temperatura da célula). No gráfico à direita é apresentada a resposta do MFV a uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> em quatro níveis de temperaturas.

Figura 9 – Curvas de tensão versus corrente para variações de irradiância solar e temperatura de MFV policristalino, *CanadianSolar*, modelo CS6K-270P.



Fonte: Adaptado de [CanadianSolar \(2016\)](#).

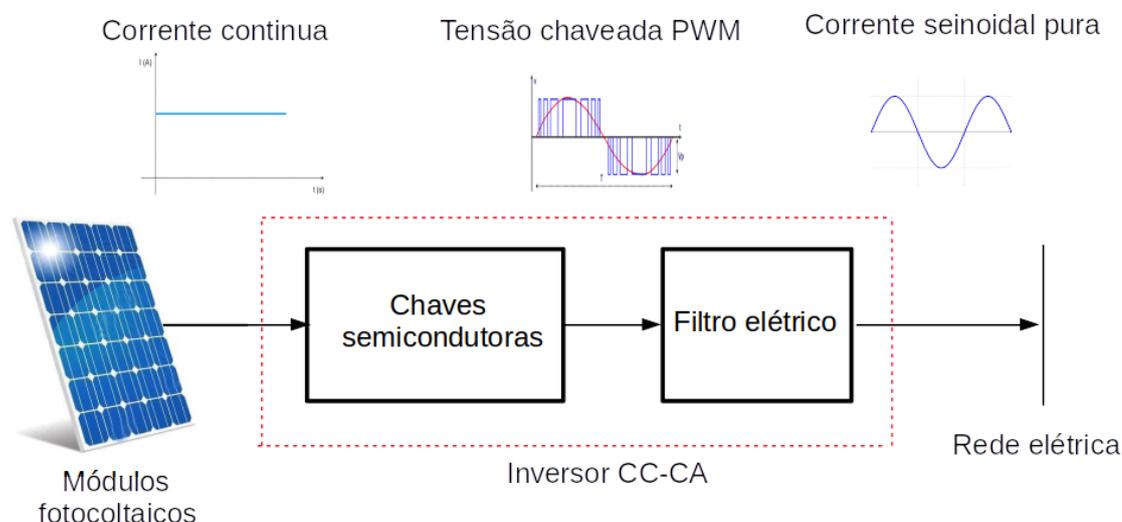
### 2.1.3.2 Inversor

O inversor para SMGFVs é o responsável por converter a corrente contínua (CC) gerada pelos MFVs em corrente alternada (CA). Após a conversão, essa energia é entregue diretamente à rede elétrica. Segundo [Luque e Hegedus \(2003\)](#), esse componente não apenas converte de forma eficiente a energia elétrica, como possui a capacidade de gerenciar de forma automática o seu funcionamento diário. Além disso, um algoritmo interno escolhe o melhor ponto de trabalho para contornar as flutuações nos níveis de radiação solar. Pode-se mencionar também, a existência dos dispositivos para proteção de eventuais anomalias elétricas que possam ocorrer na rede ou no conjunto de MFVs. [Villalva \(2015\)](#) afirma que o inversor funciona como fonte de corrente e não tem a capacidade de fornecer tensão elétrica para os consumidores. Importante mencionar que na ausência ou falha no fornecimento de eletricidade da concessionária de energia elétrica o inversor para de funcionar.

Em relação ao controle da forma de onda e nível de tensão de saída do inversor, [CRESESB \(2014\)](#) afirma que esse tipo de inversor opera com a estratégia de controle de largura de pulso (PWM) sobre componentes semicondutores, como IGBTs ou MOSFETs.

Na Figura 10 é ilustrado o diagrama esquemático de um inversor para SMGFV. A corrente contínua gerada pelos MFVs é convertida em tensão chaveada PWM, filtrada e convertida em corrente senoidal a ser entregue à rede elétrica.

Figura 10 – Ilustração do funcionamento do inversor para SMGFV.



Fonte: Autoria própria.

Segundo Villalva (2015), esses inversores podem ser construídos para faixas de potências em torno de 250 W até valores em megawatts (MW). No entanto, para sistemas de microgeração são tipicamente encontrados em valores de até 5 kW. Vale salientar que para serem utilizados na microgeração, os mesmos devem seguir os requisitos de proteção estabelecidos pela ANEEL (2017) e pela norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR-16149:2013.

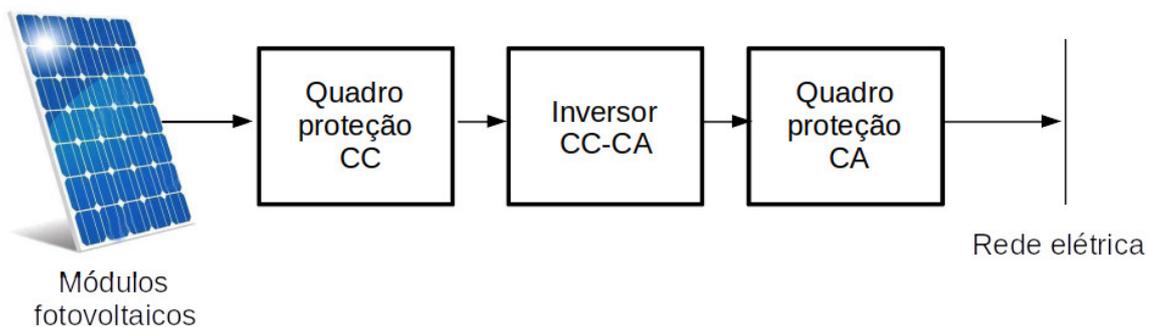
### 2.1.3.3 Quadros de proteções e seccionamento

Em um SMGFV geralmente são utilizados dois quadros de proteção e seccionamento (QPSs): um para proteção a nível de corrente contínua (CC) e um para corrente alternada (CA).

Na Figura 11 é ilustrado, de forma esquemática, um sistema com dois quadros de proteção. Um quadro fica localizado entre o conjunto de MFVs e o inversor, com a função de seccionar e proteger o sistema contra falhas a nível de CC, enquanto outro fica localizado entre o inversor e a rede elétrica, para proteger contra falhas em nível de CA.

No QPS CC estão localizados fusíveis para a proteção dos *strings* FVs, chave de desconexão CC, dispositivo de proteção contra surtos e barramento de aterramento. No QPS CA estão localizados o disjuntor, o dispositivo de proteção contra surtos e o barramento de aterramento. Dependendo do porte do sistema de microgeração, todos os dispositivos podem ser acomodados em um único quadro. Na Figura 12 é possível visualizar um QPS para CC e CA e na Figura 13 é apresentado o esquema elétrico do mesmo.

Figura 11 – Localização dos QPSs no sistema de microgeração.



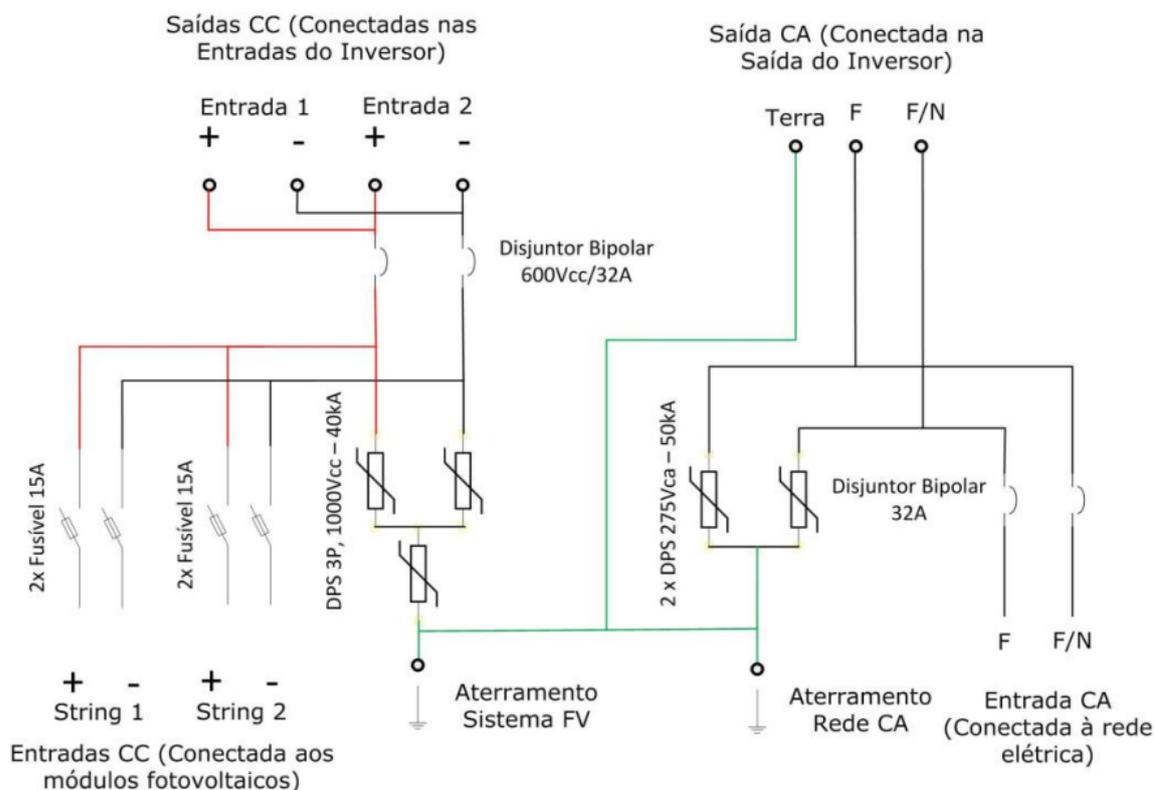
Fonte: Autoria própria.

Figura 12 – QPS CC e CA para SMGFV.



Fonte: PHB (2018)

Figura 13 – Esquema elétrico de um QPS CC e CA para SMGFV.



Fonte: PHB (2018)

#### 2.1.3.4 Monitoramento e supervisão

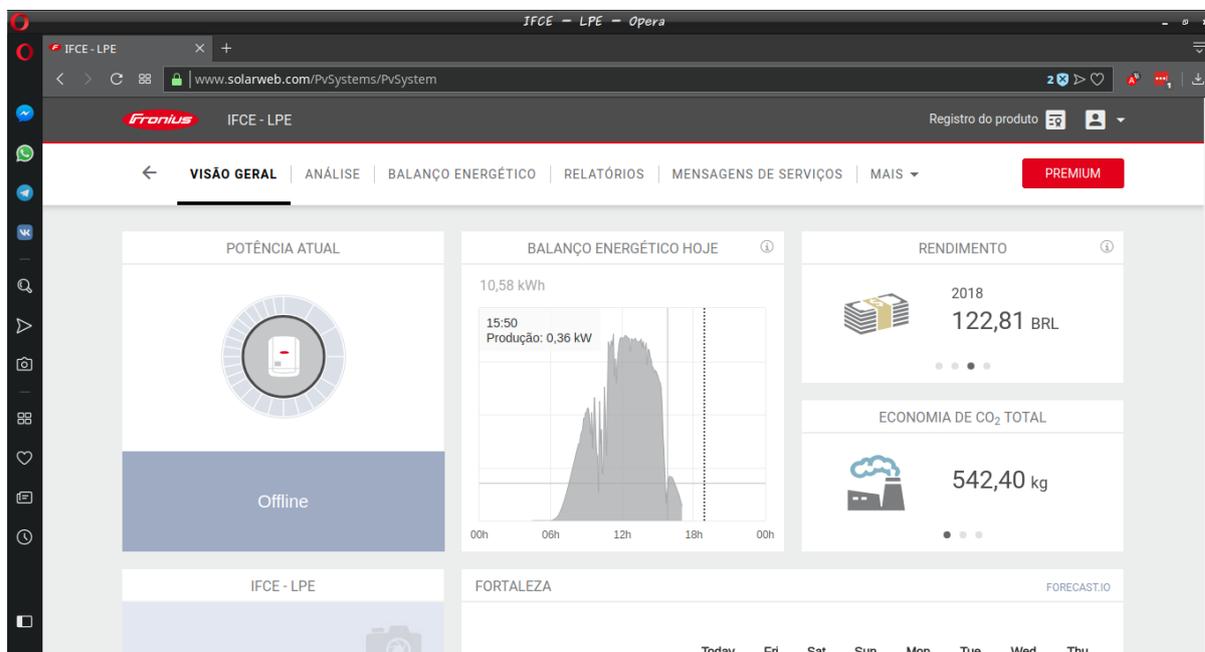
Segundo CRESESB (2014), quase todos os inversores para SMGFV disponíveis no mercado possuem a funcionalidade de monitoramento e aquisição de dados, podendo disponibilizar esses dados através de um *display* próprio ou com auxílio de outros equipamentos. Os dados coletados podem ser valores instantâneos de potência, tensão e corrente contínuas e alternadas. Há ainda, inversores que aceitam a conexão de sensores externos e podem conectar-se com a internet.

No entanto a maioria desses sistemas de monitoramento, quando utilizando as funções habilitadas de fábrica, apresentam algumas limitações em relação ao acesso aos dados coletados. Para que o usuário tenha acesso pleno, é necessário pagar por funções adicionais, contratando o serviço do fabricante ou comprando um equipamento específico.

Um exemplo de sistema monitoramento é apresentado na Figura 14, onde é possível visualizar uma imagem retirada da página *web* oferecida pelo próprio fabricante de inversores FRONIUS, monitorando um SMGFV. Esse monitoramento é realizado através da coleta de dados pelo inversor *grid-tie*, vendido pelo próprio fabricante, e posterior processamento remoto dessas informações. Caso o inversor esteja conectado a *web* os dados coletados são processados e apresentados através de endereço *web* disponibilizado pelo fabricante, que oferece duas modalidades de monitoramento, uma versão básica e uma

*Premium.* A versão *Premium* disponível através de assinatura de serviço possibilita acesso a todos os dados e relatórios coletados do sistema de geração.

Figura 14 – Página *web* oferecida pelo fabricante de inversores Fronius para o monitoramento do SMGFV.



Fonte: Adaptado de [FRONIUS \(2018\)](#).

Nesse sistema oferecido pelo fabricante FRONIUS o monitoramento é realizado ao nível do inversor, identificando assim falhas e perdas de desempenho apenas no *string* de MFVs conectado ao inversor. Há no entanto soluções comerciais mais completas e indicadas para microgeração como a apresentada na Figura 15. Na Figura é ilustrado um sistema de geração, monitoramento e detecção de falhas oferecido pelo fabricante SOLAREEDGE, em que o monitoramento é realizado ao nível dos MFVs, do *string* e de múltiplos SMGFVs.

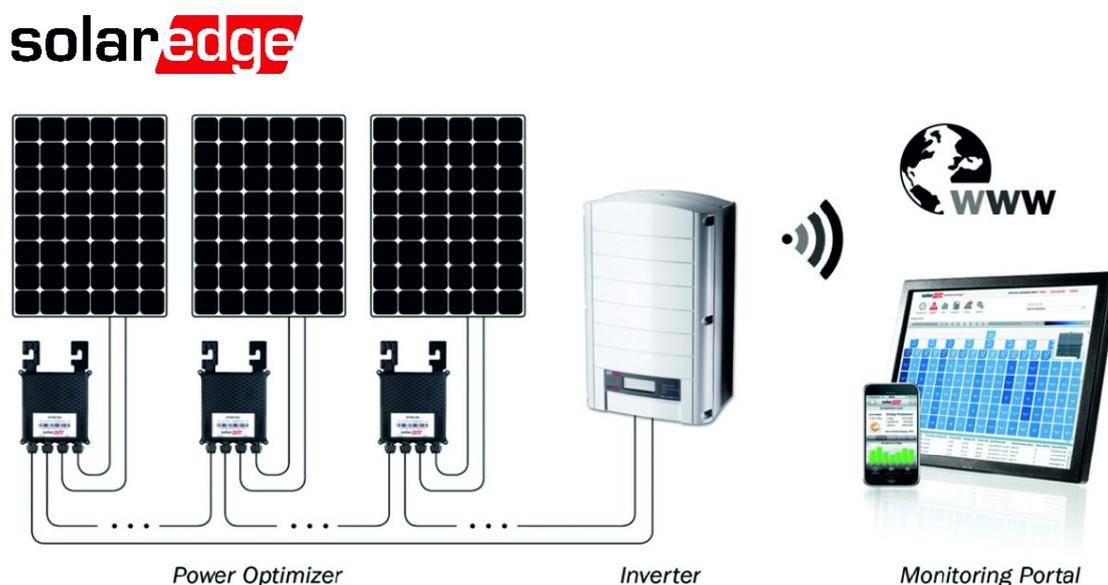
No sistema oferecido pelo fabricante SOLAREEDGE cada MFV possui um conversor CC/CC, também chamado de otimizador de potência, que busca o máximo aproveitamento da geração. A energia convertida por cada um dos conversores é somada e entregue a um inversor *grid-tie* e desse, segue para a rede elétrica. As informações coletadas também são enviadas pela fiação do sistema para o inversor *grid-tie* e posteriormente para uma página web, onde são processadas e armazenadas.

Há inúmeros produtos e serviços oferecidos por vários fabricantes, cabendo assim ao usuário analisar o custo-benefício de cada solução oferecida no mercado.

#### 2.1.4 Defeitos e Falhas

Os SMGFV são bastante confiáveis e robustos, no entanto, [CRESESB \(2014\)](#) afirma que pelo fato de funcionarem em paralelo com a rede elétrica, a ocorrência de defeitos e

Figura 15 – Sistema de geração, monitoramento e detecção de falhas oferecido pelo fabricante SOLAREEDGE.



Fonte: [SOLAREEDGE \(2018\)](#).

falhas pode demorar a ser detectada, prejudicando assim o desempenho global do sistema e até mesmo o levando ao colapso. Apesar de alguns fabricantes de MFVs e inversores oferecerem produtos com garantias de mais de 10 anos contra defeitos em seus produtos, falhas podem ocorrer e não serem percebidas de imediato. [CRESESB \(2014\)](#) acrescenta que as falhas nos componentes podem ser causadas por defeitos de fabricação, erros de projeto e de montagem do sistema, sujeira nos MFVs e falta de manutenção preventiva.

Mesmo que a falha seja em apenas um MFV, seu efeito é sentido por todo o sistema, reduzindo assim o desempenho global. Isso ocorre porque a potência gerada pelo SMGFV é igual a soma das potências geradas por cada MFV.

As falhas e condições de funcionamento que podem afetar o desempenho de um SMGFV variam desde o sombreamento de um MFV, ou parte dele, até falhas que podem destruir o sistema ou causar riscos a integridade física dos usuários do sistema.

[Banavar et al. \(2012\)](#) descrevem as falhas mais comuns que podem afetar um SMGFV como sendo:

- Sombreamento - redução da potência gerada pelo sistema provocada pelo sombreamento total ou parcial de MFVs.
- *Mismatch* - redução de potência provocada pelas diferenças construtivas entre os MFVs.
- Sujidade - redução de potência gerada pelo acúmulo de sujeira sobre a superfície dos

MFVs.

- Falha de terra - redução de potência e risco à integridade do usuário, provocada pela fuga de corrente do circuito para a terra.
- Arcos de corrente contínua - formação de arco elétrico entre cabos elétricos ou entre terminais que estão com isolamento danificado.
- Alta resistência entre conexões - alta resistência elétrica nas conexões entre células, entre MFVs ou nas conexões do sistema.
- Falhas no inversor - por ser formado por circuitos eletrônicos, o inversor é suscetível a falhas em seus componentes.
- Ilhamento - funcionamento do sistema mesmo sem a rede elétrica estar disponível.

A proteção contra falhas por ilhamento é prevista por [ANEEL \(2017\)](#) em sistema conectados a redes. Segundo [ANEEL \(2017\)](#), todos os inversores utilizados no Brasil para conexão de SMGFV devem possuir proteção contra ilhamento.

## 2.2 Sistemas de monitoramento para geração fotovoltaica

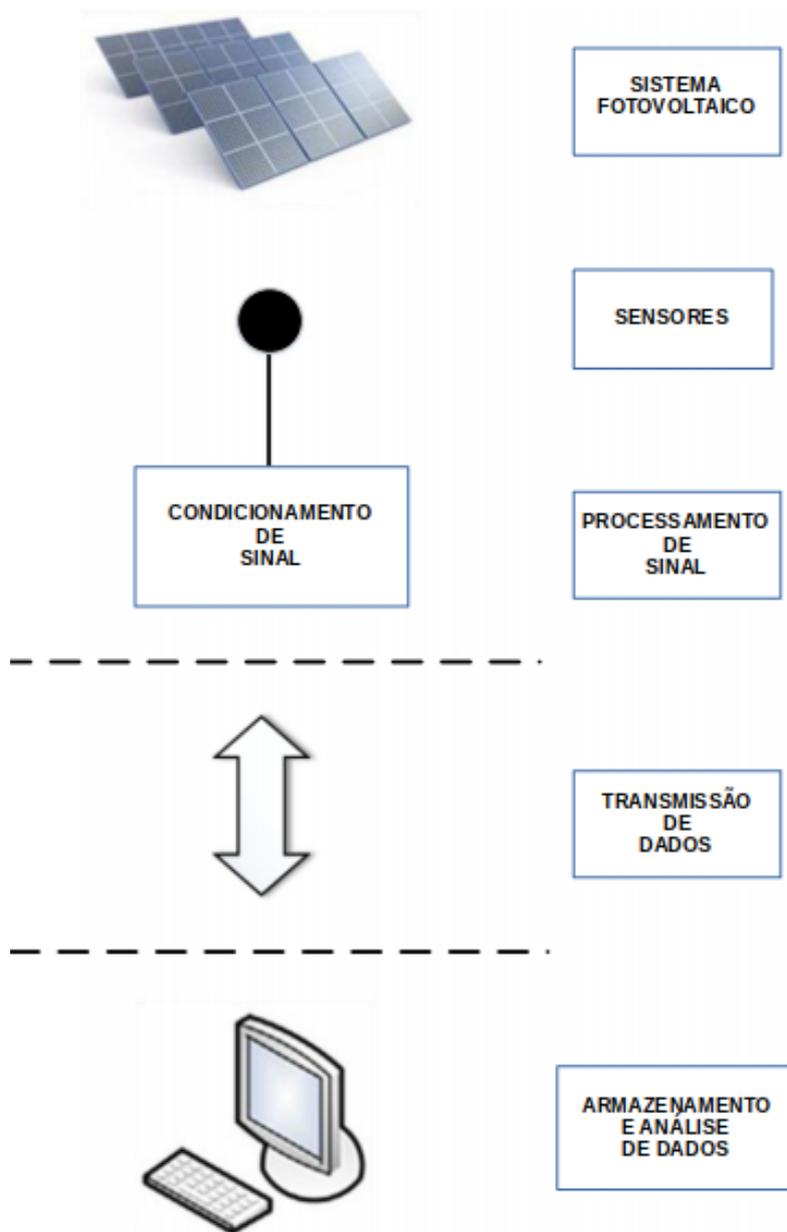
[Madeti e Singh \(2017\)](#) afirmam que os sistemas de monitoramento podem ser classificados em sistemas baseados em terra e de observação aérea. Os primeiros são os mais frequentemente encontrados na literatura e geralmente possibilitam o monitoramento em tempo real, através da coleta de dados via sensores ao nível da planta de geração. Os de observação aérea não se utilizam de sensores ao nível do sistema, mas de avaliações ambientais e visuais do sistema. Esse tipo de monitoramento normalmente apresenta um custo menor, em contrapartida possuem baixa precisão e podem ser fortemente afetados pelas condições climáticas onde a instalação está localizada.

Na Figura 16 é apresentado um diagrama de bloco das partes componentes de um sistema de monitoramento baseado em terra. São ilustradas as três partes básicas: sistema de aquisição de dados, onde as variáveis são obtidas; meio de transmissão dos dados e sistema para análise e armazenamento das informações coletadas, que pode ser um computador pessoal ou unidade dedicada à essa função.

Segundo [Madeti e Singh \(2017\)](#), esses sistemas podem diferir entre si em relação aos parâmetros monitorados, sensores, sistema de aquisição de dados, mecanismo utilizado para transferência de dados, *software* e método de monitoramento.

Na Figura 17 vê-se um diagrama de uma SMGFV, onde são apresentados os pontos de medição e as variáveis que, segundo [Commission et al. \(1998\)](#), podem ser utilizadas por sistemas de monitoramento em tempo real.

Figura 16 – Diagrama de blocos de um sistema de monitoramento baseado em terra para SFVs.

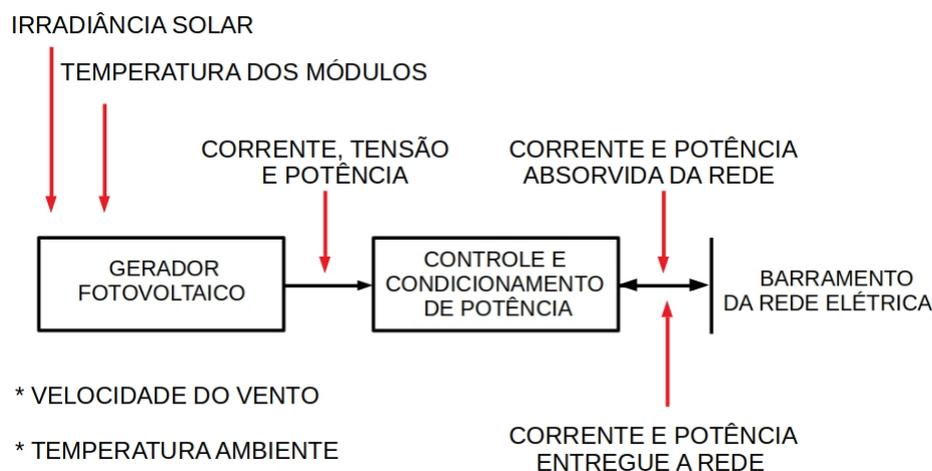


Fonte: Adaptado de [Madeti e Singh \(2017\)](#)

Podem ser medidos parâmetros ambientais (velocidade do vento, temperatura ambiente e irradiância solar global no plano dos MFVs) ou indicadores referentes ao sistema (temperaturas dos MFVs, corrente, tensão e potência). A escolha desses parâmetros, dos sensores utilizados, as precisões e quantidades, dependerá da técnica empregada e dos objetivos que se deseja alcançar.

[Madeti e Singh \(2017\)](#) afirmam que para a medição e registo dos parâmetros mencionados acima são utilizados sistemas de aquisição de dados, denominados por eles como DAQ - *Data Acquisition*. Os autores afirmam ainda que os DAQs utilizados em sistemas de energias renováveis podem ser basicamente de três tipos: os baseados em

Figura 17 – Identificação de parâmetros e os pontos de medições utilizados nos SMGFVs.

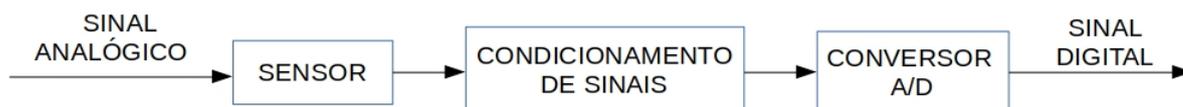


Fonte: Autoria própria.

microcontroladores, os que se utilizam de *data loggers* comerciais e os que são desenvolvidos em torno de computadores.

Esses sistemas de monitoramentos podem conter ou aceitar sensores que terão seus sinais de saída tratados e convertidos em valores digitais, que posteriormente serão processados pelo sistema de monitoramento. Na Figura 18 é apresentado um diagrama de blocos de um processo de digitalização de sinais analógicos por um DAQ.

Figura 18 – Processo de digitalização de sinais analógicos por um DAQ.



Fonte: Autoria própria.

A aquisição de dados através de dispositivos microcontrolados e placas de prototipagens microcontroladas é uma alternativa viável e de baixo custo para serem utilizadas em sistemas de monitoramento. Exemplos de trabalhos que utilizam esses dispositivos são apresentados por Rosiek e Batlles (2008), Halmeman (2014) e Coelho et al. (2016).

Madeti e Singh (2017) afirmam que para se transferir os dados do sistema de aquisição até a unidade de processamento podem ser utilizados três meios: cabos de comunicação, comunicação *power line* e rede sem fio. Dentre esses meios, a comunicação *power line* e a rede sem fio são as que mais se destacam.

Uma das vantagens da comunicação por *power line* é o aproveitamento dos cabos elétricos do SFV para a transferência de dados, evitando assim, os custos e o incômodo

da conexão através de cabos próprios. Essa e outras vantagens da utilização dessa forma de comunicação são discutidas por [Liu et al. \(2010\)](#) e alguns exemplos da sua aplicação podem ser encontrados em [Sanchez-Pacheco et al. \(2014\)](#), [Han, Lee e Kim \(2015\)](#) e [Coelho et al. \(2016\)](#).

A comunicação sem fio apresenta como vantagens a não utilização de cabos para a transferência de dados e a fácil expansão. Segundo [Madeti e Singh \(2017\)](#), para comunicação sem fio podem ser utilizadas comunicação por infravermelho, *Bluetooth* e redes *Wireless Local Area Network* (WLAN). Entre as tecnologia de comunicação sem fio, a WLAN se mostra promissora para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento onde há a possibilidade de se aproveitar de redes pré-existentes. [Castro \(2015\)](#) comenta que a maioria dos SMGFVs são instaladas por consumidores residenciais e comerciais onde são grandes as possibilidades de haver um rede WLAN disponível. Segundo o [IBGE \(2018\)](#), cerca de 70 % dos domicílios brasileiros, em 2016, possuíam internet e em 71,4 % das conexões, a conexão à rede foi realizada através de banda larga fixa residencial.

A combinação de redes WLAN com acesso à internet pode facilitar a implementação de sistemas de monitoramento de SFV, em que os dados podem ser processados em nuvens e disponibilizados para acesso remoto.

Para o processamento e armazenamento dos dados coletados pelos sistemas de aquisição, podem ser utilizados computadores pessoais, minicomputadores, como por exemplo o Raspberry Pi, além do processamento em nuvens, que pode ser visto no trabalho de [Pereira et al. \(2018\)](#). Nessas unidades de processamentos podem ser implementados algoritmos, aplicações e até redes neurais que podem analisar os dados coletados e tomar decisões com base em padrões e valores dos parâmetros analisados. Exemplos de técnicas de processamento de dados que podem ser utilizados em sistemas de monitoramento para se detectar falhas são apresentadas por [Jiang e Maskell \(2015\)](#), [Cristaldi, Leone e Vergura \(2016\)](#) e [Chen e Wang \(2017\)](#).

## 2.3 Propostas de sistemas de monitoramento e detecção de falhas em SMGFV

A pesquisa e o desenvolvimento de sistemas de monitoramento para SFVs são temas recorrentes na literatura científica, como é relatado por [Madeti e Singh \(2017\)](#). É possível encontrar trabalhos que empregam as mais variadas técnicas e componentes para se alcançar esse propósito.

Alguns autores buscam monitorar sistemas de geração FV através da coleta e registro dos parâmetros relacionados a geração e condições climáticas. Com isso buscam informar aos seus usuários sobre o estado atual do sistema de geração e de seus componentes. Outros

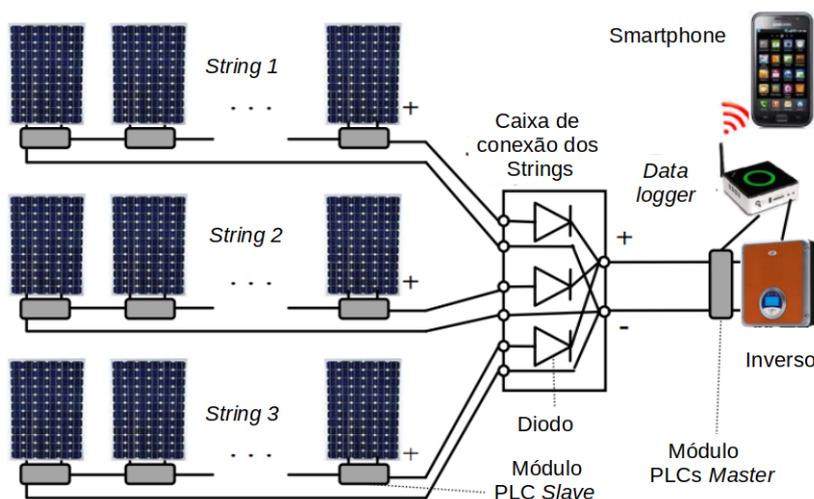
focam em técnicas de detecção de falhas que podem prejudicar o desempenho da geração ou até causar danos permanentes ao sistema.

Como exemplos de trabalhos relacionado ao monitoramento de sistemas de geração é possível citar os desenvolvidos por Han, Lee e Kim (2015), Pereira et al. (2018) e Choi et al. (2017).

Han, Lee e Kim (2015) propõem um sistema de monitoramento para SMGFV que coleta dados sobre o funcionamento dos MFVs e do inversor utilizando a tecnologia de comunicação *Power Line Communication* (PLC). O projeto faz uso de módulos desenvolvidos pelos autores para a comunicação PLC, um *data logger* e um aplicativo para *smartphones* e *tablets* funcionando como interface gráfica.

Na Figura 19 é possível visualizar a estrutura do sistema desenvolvido por Han, Lee e Kim (2015) monitorando um SMGFV que possui três *strings* FVs, uma caixa de conexão e um inversor.

Figura 19 – Representação do sistema de monitoramento desenvolvido por Han, Lee e Kim (2015).



Fonte: Adaptado de Han, Lee e Kim (2015).

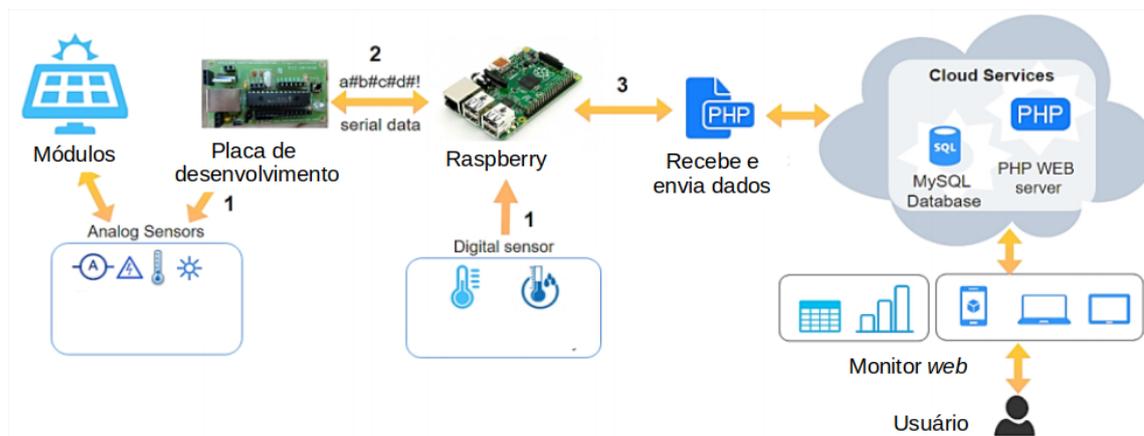
No sistema desenvolvido por Han, Lee e Kim (2015) cada MFV é equipado com um módulo PLC *Slave*, que são os responsáveis por medir a temperatura, corrente e tensão e enviá-las, através dos cabos elétricos do sistema, para o módulo PLC *Master*, onde são processadas. O módulo PLC *Master*, além de processar as informações recebidas pelos módulos PLCs *Slave*, realizam a medição da corrente e tensão que chegam ao inversor e enviam todos esses dados recebidos para o *data logger*. Esse, por sua vez, armazena os dados através de uma placa mini-ITX que possui acesso a internet. O aplicativo desenvolvido permite ao usuário ter acesso, de forma remota, às informações armazenadas no *data logger* e ainda, ser alertado sobre eventuais anomalias no funcionamento.

Segundo os autores, o sistema proposto foi testado em campo e se mostrou viável

para adoção pelo usuário final. Além disso, pode contribuir para o bom desempenho do sistema de geração ao manter o usuário informado sobre suas condições de funcionamento. Entretanto o projeto apresenta uma relativa complexidade de construção e implementação das placas de coleta de dados.

O trabalho desenvolvido por [Pereira et al. \(2018\)](#) apresenta uma abordagem diferente da citada acima. Neste, os autores propõem um sistema de monitoramento remoto para fontes descentralizadas de geração de energia renovável, fazendo uso de um Raspberry Pi (RPI) e o conceito de *Internet of Things* (IoT). Para isso, uma placa de desenvolvimento microcontrolada SanUSB é utilizada com a finalidade de coletar informações de tensão, corrente, temperatura de funcionamento dos MFVs, temperatura ambiente, irradiação solar e umidade relativa do ar, através de sensores analógicos. Todas essas informações são enviadas através da comunicação serial para o RPI. Este, coleta dados de sensores digitais de temperatura ambiente e umidade do ar e possui conexão com a internet, que permite o envio dos dados para processamento e armazenamento em nuvem. Por fim, as informações coletadas são disponibilizados para o usuário através de um aplicativo. Na Figura 20 é possível visualizar a estrutura desse sistema.

Figura 20 – Representação do sistema de monitoramento desenvolvido por [Pereira et al. \(2018\)](#).



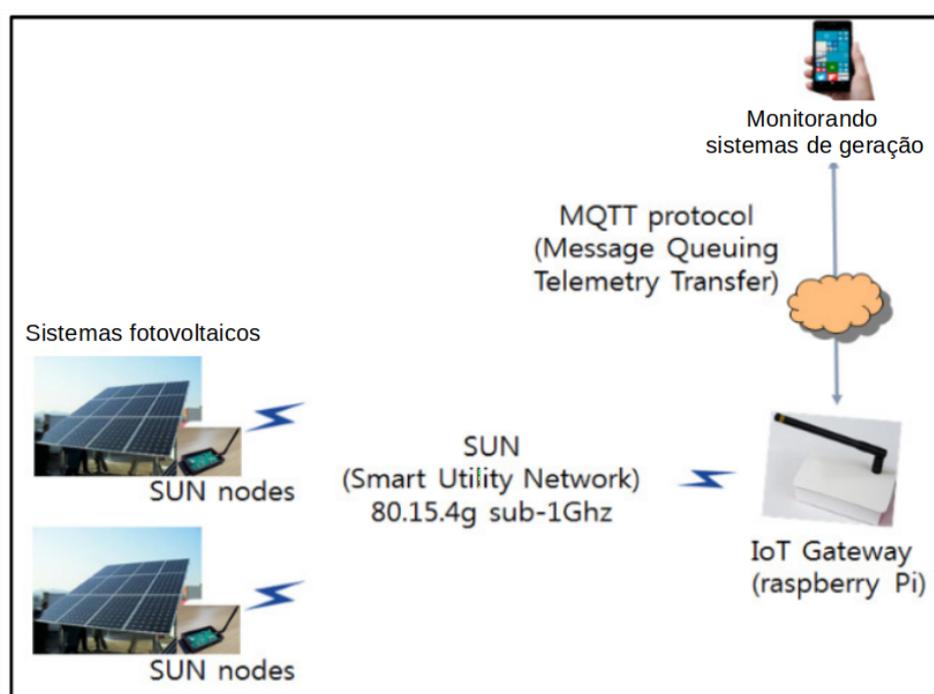
Fonte: Adaptado de [Pereira et al. \(2018\)](#).

Os autores afirmam que o sistema é modular e suporta o acesso de múltiplos usuários ao mesmo tempo e a expansão para o monitoramento de mais sistemas de geração. Informam ainda que sua construção apresentou um baixo custo quando comparada com os sistemas de monitoramento existentes no mercado, além de fácil implementação, pois possui arquitetura aberta e custo inicial zero para uso de *softwares*.

Esse sistema apresenta como atrativo a sua fácil implementação e capacidade de processamento em nuvens. No entanto não prevê um cenário em que a conexão com a internet não está disponível. Além disso a utilização de comunicação entre as placas através de cabos, limita a sua utilização a sistemas centralizados.

Um outro trabalho semelhante ao acima citado é apresentado por [Choi et al. \(2017\)](#). Nele também é utilizado o conceito de IoT e um mini computador RPi, no entanto é utilizada uma rede *Smart Utility Networks* (SUN) para conectar os dispositivos responsáveis pela coleta de informações dos sistemas de geração ao RPi, que funciona como *gateway*. No RPi é instalado um *Broker Message Queuing Telemetry Transfer* (MQTT), responsável por prover a comunicação com um *smartphone*. Através de um aplicativo instalado em *smartphone* é possível monitorar o funcionamento dos sistemas de geração atendidos. Na Figura 21 é possível visualizar a estrutura desse sistema.

Figura 21 – Representação do sistema de monitoramento desenvolvido por [Choi et al. \(2017\)](#).

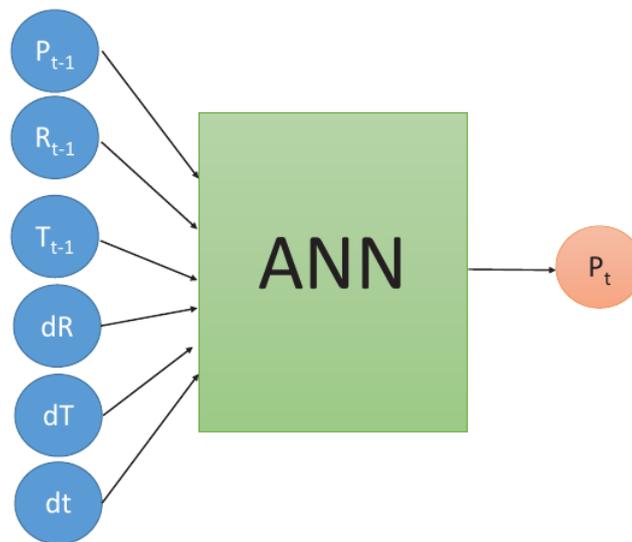


Fonte: Adaptado de [Choi et al. \(2017\)](#).

Para detecção de falhas e perda de desempenho de funcionamento em sistema de geração FV, pode-se citar o trabalho desenvolvido por [Cristaldi, Leone e Vergura \(2016\)](#). Nesse projeto, os autores propõem uma rede neural capaz de detectar a perda de desempenho causada por envelhecimento dos MFVs e o acúmulo de poeira. Nele os autores se utilizam de uma rede neural de arquitetura *feedforward*, que possui uma camada de entrada, uma camada oculta e uma camada de saída. A mesma, recebeu treinamento supervisionado, aprendendo a correlação entre a potência produzida, a temperatura dos MFVs e a radiação solar. A potência de saída atual ( $P_t$ ) é dependente de valores prévios de potência de saída ( $P_{t-1}$ ), radiação solar ( $R_{t-1}$ ), temperatura dos MFVs ( $T_{t-1}$ ) e da variação entre os valores atuais e os anteriores de radiação solar ( $dR$ ), temperatura dos MFVs ( $dT$ ) e do intervalo de tempo entre duas amostragens consecutivas ( $dt$ ).

Na Figura 22 é possível visualizar de forma esquemática a rede neural proposta, onde uma camada de entrada recebe as variáveis acima citadas, a rede neural é representada por um bloco nomeado de ANN e há uma saída chamada  $P_t$ .

Figura 22 – Representação esquemática da rede neural proposta por [Cristaldi, Leone e Vergura \(2016\)](#).



Fonte: [Cristaldi, Leone e Vergura \(2016\)](#).

O algoritmo, por sua vez, baseia-se em três fases, sendo a primeira um aprendizado da correlação entre os valores de entrada e saída de potência. Na segunda fase, são realizadas estimativas com base nos valores treinados e por fim obtém-se um diagnóstico da perda de potência gerada. Os autores desenvolveram duas configurações de sistemas de detecção em que a probabilidade de alarme falso é de menos de 1%. Os mesmos afirmam que o sistema proposto pode ser aplicado a qualquer tipo de usinas FVs e necessita monitorar apenas três parâmetros, que são irradiância solar, temperatura dos MFVs e energia produzida.

Como base nas informações apresentadas pelos autores dos trabalhos acima citados, o monitoramento e a detecção de falhas em sistemas de geração fotovoltaica é viável e pode ser realizada de diferentes formas e ajustado para diferentes tamanhos de sistemas.

## 2.4 Tecnologias utilizadas para o desenvolvimento do sistema proposto

Através da leitura dos assuntos abordados até a presente seção, compreendeu-se a composição e funcionamento de um SMGFV, além de identificar as principais falhas e condições de falhas que podem afetar o correto funcionamento desse tipo de sistema. Com base nisso, entendeu-se a razão do sombreamento de uma única célula FV de um SMGFV

ou o acúmulo de sujeira sobre as faces dos MFVs serem capazes de reduzir drasticamente a performance do sistema de geração.

Viu-se também que há soluções comerciais, tanto já incorporadas no próprio inversor do sistema de geração como também equipamento ou sistema opcional, capazes de monitorar e identificar falhas de funcionamento do SMGFV. Além disso, foram apresentadas propostas acadêmicas capazes de monitorar e identificar falhas se utilizando dos mais variados métodos.

Com base nisso, optou-se por desenvolver e implementar um sistema de monitoramento, detecção e identificação de falhas para sistemas de microgeração FV que seja modular e facilmente escalável. Através desse projeto busca-se facilitar o acompanhamento local e remoto do funcionamento do sistema de microgeração, identificação e localização de falhas de desconexão, danos em células de MFVs e sombreamento, além de identificar situações em que os MFVs estejam sujeitos.

Para alcançar os objetivos propostos, decidiu-se pela utilização de placas microcontroladas para coleta de dados, de um protocolo de comunicação leve, que pudesse ser utilizado através de rede *Wi-Fi* para comunicação dos componentes do sistema e por uma unidade de processamento e armazenamento de dados local. Para permitir o armazenamento e o acesso remoto às informações processadas é utilizado um aplicativo de mensagem em nuvem. Enquanto para a detecção de falhas, escolheu-se utilizar algoritmos e uma rede neural *Perceptron* multicamadas (PMC).

Optou-se pelo uso da rede *Wi-Fi*, pois o foco desse trabalho são SMGFV e esses sistemas são adotados em sua maioria por consumidores residenciais e comerciais, que utilizam amplamente esse tipo de rede *wireless*. Além disso, a mesma é de fácil implementação e manutenção. Como placa microcontrolada optou-se pela utilização de placas Esp NodeMCU, visto serem compactas, modulares e facilitarem a conexão com redes *Wi-Fi*.

Como protocolo de comunicação, para possibilitar a troca de informação entre os componentes do sistema proposto, decidiu-se pela utilização do protocolo MQTT, pois o mesmo é leve e amplamente utilizado em trabalhos relacionados com projetos de internet das coisas. Segundo [Stansberry \(2015\)](#), esse protocolo é ideal para dispositivos embarcados por apresentar baixo consumo, gerenciador de mensagens e mensagens pequenas.

Para armazenar e processar informações a proposta é utilizar dois meios: um local e outro remoto. Como equipamento local se utilizou um minicomputador Raspberry Pi, devido ao seu poder computacional se adequar a este projeto. Além disso, é um equipamento de pequenas dimensões e de custo relativo baixo. Como meio remoto de armazenamento de informações é utilizado o aplicativo de mensagem Telegram, pois o mesmo facilita o armazenamento em nuvens de dados e permite a criação e utilização de *bots*.

A utilização de redes neurais artificiais apresenta grande capacidade para detecção

de falhas em sistemas de geração fotovoltaica, pois segundo [Silva, Spatti e Flauzino \(2010\)](#), elas possuem uma elevada habilidade de mapear sistemas não-lineares e aprender a partir de informações obtidas. Ainda segundo os autores, elas são modelos computacionais inspirados no sistema nervoso de seres vivos, que possuem a capacidade de aquisição e manutenção do conhecimento adquirido. Podem ser definidas como um conjunto de unidades de processamento, chamadas de neurônios artificiais, que são interligadas por um grande número de interconexões representadas por vetores ou matrizes de pesos sinápticos.

Através da integração desses componentes e tecnologias buscou-se convergir em um único sistema as propostas de monitoramento que foram desenvolvidas por [Pereira et al. \(2018\)](#) e [Choi et al. \(2017\)](#), bem como a capacidade de aquisição e manutenção de conhecimento das redes neurais apresentadas no trabalho de [Cristaldi, Leone e Vergura \(2016\)](#). Além disso, buscou-se adicionar a comodidade e presença dos sistemas de mensagens em nuvens nos *smartphones* dos proprietários dos sistemas de microgeração FV, para facilitar o processo de monitoramento e notificação de falhas na geração.

No capítulo seguinte são detalhados os componentes e tecnologias descritos.

## 3 Materiais e Métodos

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do sistema proposto para o monitoramento e detecção de falhas para SMGFV. Inicialmente é detalhado o sistema de microgeração utilizado e em seguida são apresentados os equipamentos utilizados para a coleta, transmissão, processamento e armazenamento dos dados coletados. Por último, são apresentadas as tecnologias utilizadas para a construção da aplicação desenvolvida, interfaces gráficas e detecção de falhas.

### 3.1 Sistema de microgeração

O SMGFV escolhido para o desenvolvimento deste trabalho está instalado nas dependências do IFCE - Campus Fortaleza, no bloco da indústria. As coordenadas da localização são: Latitude -3.744295 e Longitude -38.536891. O mesmo é composto por um conjunto de 8 MFVs conectados em série e um inversor *grid-tie* monofásico, totalizando uma potência de pico de 2160 Wp. A eletricidade gerada é entregue diretamente à rede elétrica do prédio e registrada pelo *Data Logger* interno do inversor. Os MFVs estão dispostos sobre a caixa d'água do bloco, que possui 2 andares. As faces dos MFVs encontram-se direcionadas para o noroeste e com uma inclinação de 30° em relação ao plano horizontal. O direcionamento e inclinação dos MFVs foram escolhidos para se obter o melhor aproveitamento do espaço físico disponível sobre a caixa d'água e das condições ambientais locais. Na Figura 23 é possível visualizar a disposição dos MFVs sobre a laje da caixa d'água.

Figura 23 – Disposição dos 8 MFVs sobre a caixa d'água do prédio.



Fonte: Autoria própria

Os MFVs utilizados são da marca Canadian Solar, modelo CS6K-270P e potência individual máxima de 270W. Os mesmos são compostos pela associação em série de 60 células policristalinas e três diodos de *bypass*. As características desses MFVs nas condições padrão de teste (Standard Test Conditions - STC) para a irradiância de 1000W/m<sup>2</sup>, um espectro de massa de ar (*spectrum Air Mass* - AM) de 1.5AM e uma temperatura de 25 °C de suas células podem ser visualizadas na tabela 1.

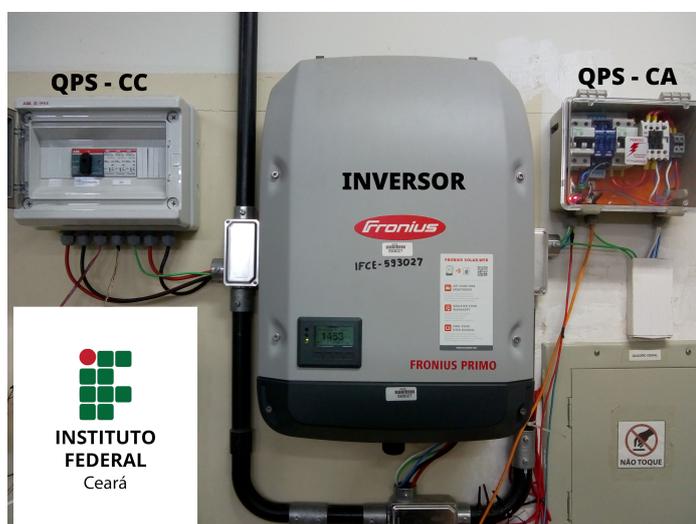
Tabela 1 – Módulo Canadian Solar-CS6K-270P

Parâmetro	Valor
Potência Máxima (Pmax)	270 W
Tensão em Pmax (Vmp)	30,80 V
Corrente em Pmax (Imp)	8,75 A
Tensão de Circuito aberto (Voc)	37,90 V
Corrente de curto - circuito (Isc)	9,32 A
Coefficiente de Temperatura (Pmax)	-0,41 %/°C
Coefficiente de Temperatura (Voc)	-0,31 %/°C
Coefficiente de Temperatura (Ioc)	0,05 %/°C
Temperatura de operação	-40 °C a 85 °C
Eficiência do Painel	16,50 %

A garantia dada pelo fabricante é de 10 anos contra defeitos de fabricação e 25 anos para a resposta linear da potência de saída. É contemplado com o selo do PROCEL de economia de energia e com classificação “A” em eficiência energética pelo INMETRO.

A eletricidade gerada pelo conjunto de MFVs é entregue a um inversor *grid-tie* monofásico da marca Fronius, modelo Fronius Primo 3.0. Esse inversor está instalado junto com os seus QPSs CC e CA, no laboratório de processamento de energia (LPE), no primeiro andar do prédio. Na Figura 24 é possível visualizar a disposição do inversor e dos seus respectivos QPSs.

Figura 24 – Disposição do inversor e de seus QPSs.



Fonte: Autoria Própria

Esse inversor possui, em seu pacote de comunicação, portas WLAN/LAN que possibilitam a conexão a outros inversores e à rede *web*. Caso o inversor esteja conectado à internet, é possível configurá-lo para se comunicar com a página *web* do fabricante (www.solarweb.com), o que possibilita acompanhar remotamente o seu funcionamento e consultar relatórios. Possui ainda, *Datalogger* e *Webserver* integrado para armazenamento e visualização local dos dados relativos à geração FV. As características elétricas desse inversor são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 – Características elétricas do inversor Fronius Primo 3.0

Parâmetro	Valor
Max. corrente de entrada (Idc max1 / Idc max2)	12 A / 12 A
Tensão de entrada (Udc)	80 - 1000 V
Corrente em Pmax (Imp)	8,75 A
Faixa de tensão MPP (Umpp min - Umpp max)	200 - 800 V
Número de conexões CC	2 + 2
Max.potência de saída	3.000 VA
Max. corrente de saída (Iac max)	13 A
Conexão à rede (faixa de tensão)	220 V / 230 V (180 V - 270 V)
Frequência	50 Hz / 60 Hz (45 - 65 Hz)
Distorção harmônica total	< 5 %
Max. eficiência	97,60 %

### 3.2 Equipamentos para coleta, transmissão, armazenamento, processamento e visualização dos dados

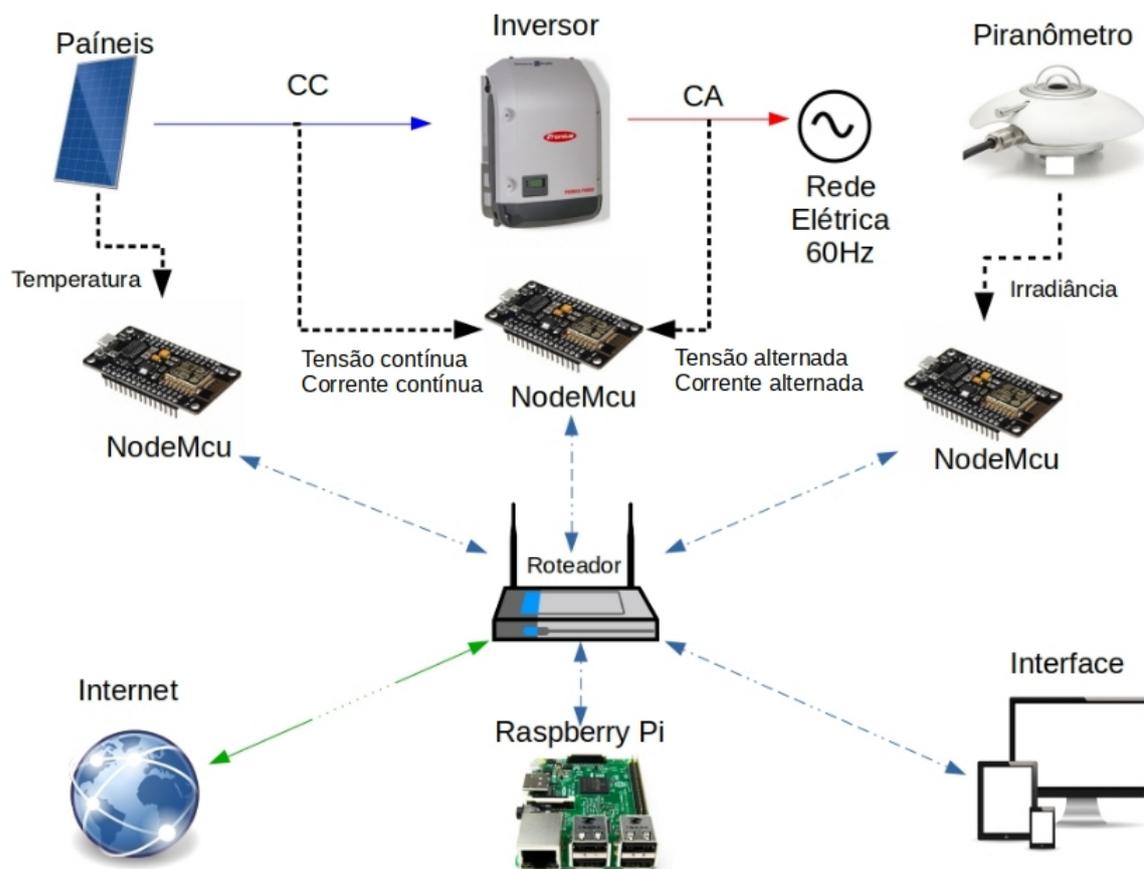
Para coleta, transmissão, armazenamento, processamento e visualização dos dados foram integrados sensores, placas microcontroladas NodeMCU, uma rede *Wi-Fi* com acesso à internet, um Raspberry Pi (RPi) e interfaces gráficas.

Na Figura 25 é apresentada uma imagem ilustrativa dos principais componentes utilizados. Na figura é possível visualizar um SMGFV, que tem amostrados os seus níveis de tensões, correntes e temperaturas dos MFVs, além de um piranômetro que também tem seus dados de irradiância solar coletados. Esses dados são adquiridos através de Placas NodeMCU e enviados, via rede *Wi-Fi*, através do protocolo MQTT para processamento em um RPi. A rede *Wi-Fi* é fornecida por um roteador que possui acesso à internet e tem a finalidade de conectar, em uma única rede, os NodeMCUs, o RPi e os dispositivos utilizados como interfaces do sistema. Os componentes eletrônicos, tais como *smartphones*, *tablets* e *notebooks* representam as interfaces gráficas. Essas interfaces podem se conectar à rede *Wi-Fi* para visualizar as informações processadas pelo RPi.

Ainda em relação à figura, foram utilizadas setas pontilhadas para indicarem o sentido do fluxo de dados entre os componentes, uma seta contínua de cor azul para indicar

o sentido da corrente contínua e uma vermelha para a corrente alternada. As alimentações elétricas dos sensores, das placas microcontroladas, roteadores e RPi utilizados nesse projeto não foram apresentadas na figura, no entanto, na prática foram realizadas via rede elétrica do bloco.

Figura 25 – Ilustração dos componentes utilizados no sistema de monitoramento e suas conexões.



Fonte: Autoria Própria

Dentre todos os componentes apresentados na Figura 25 e descritos acima, o RPi é o componente principal do sistema proposto. O mesmo é responsável por processar, armazenar e disponibilizar, para visualização, os dados coletados. Para que essas ações fossem possíveis, foram instalados no RPi o Sistema Operacional Linux *Raspbian*, um *Broker* MQTT e a ferramenta de programação Node-RED.

Nas subseções seguintes, encontram-se detalhados os componentes descritos acima. Inicialmente são apresentados os componentes utilizados para a coleta de dados, em seguida é apresentado o RPi utilizado para o processamento desses dados e, por fim, a estrutura da rede *Wi-Fi* utilizada.

### 3.2.1 Coleta de dados

Para as coletas de dados, foram utilizados três circuitos eletrônicos que tem por base placas microcontroladas NodeMCU ESP-12E. Um circuito foi configurado para quantificar a irradiância solar, outro para coletar valores de tensão e corrente e o terceiro, para medir as temperaturas dos MFVs e de suas respectivas caixas de diodos de *bypass*. A seguir é apresentada a placa NodeMCU e, em seguida, são detalhados os circuitos eletrônicos que tem por base essa placa.

#### 3.2.1.1 NodeMCU ESP-12E

Entre as inúmeras opções de placas de prototipagem disponíveis no mercado, foi escolhida a placa microcontrolada *open source* NodeMCU ESP-12E. A escolha por esse componente levou em consideração suas características técnicas, tais como: consumo de apenas 200  $\mu\text{A}$  em modo *stand by*, possuir um conversor analógico-digital de 10 bits, 13 portas GPIO e *Wi-Fi* integrada. Essas características aliadas às suas dimensões reduzidas facilitam o desenvolvimento e a implementação de projetos para IoT.

A placa NodeMCU ESP-12E é construída em torno do microcontrolador ESP8266EX SoC (*System on a Chip*), de 32 bits e arquitetura RISC produzido pela empresa *Espressif System*. Esse é um microcontrolador completo, compacto, com acesso *Wi-Fi on-board* e corrente de operação de 80 mA. Outras informações relativas à sua arquitetura e características de funcionamento podem ser consultadas no *Datasheet* do componente, encontrado em [Espressif \(2018\)](#).

A associação do microcontrolador ESP8266EX e do circuito eletrônico necessário para o seu funcionamento em placa única torna conveniente a sua utilização, facilitando assim o processo de prototipagem. O circuito eletrônico contido na placa NodeMCU é composto por uma interface serial-usb, regulador de tensão, leds e micro botões para comando. Para facilitar a prototipagem são adicionados dois barramentos de pinos, cada um com uma função específica, nas bordas da placa. A alimentação da placa pode ser realizada através da porta micro USB. Na Figura 26 é apresentado um NodeMCU ESP8266 modelo ESP12E.

Segundo informações disponíveis em [NodeMCU \(2018\)](#), a placa NodeMCU - ESP12E apresenta as seguintes características técnicas:

- Pode operar com tensão de 3,3 V ou através de alimentação micro-USB;
- Possui consumo de menos de 200  $\mu\text{A}$  em modo *standby*;
- Corrente máxima de trabalho de 200 mA;
- Padrões Wireless: IEEE 802.11n, IEEE 802.11g, IEEE 802.11b;

- Antena embutida;
- Modos de operação: STA/AP/STA+AP;
- Suporta 5 conexões TCP/IP;
- Possui 13 *General Purpose Input/Output* (GPIO);
- GPIO com funções de PWM, I2C, SPI e UART;
- Um *Analog-to-Digital Converter* (ADC) de 10 bits e tensão de 0 a 1 V;
- Compatível com a IDE Arduino;
- Suporta linguagens de programação Lua e C++ para Arduino.

Figura 26 – NodeMCU - ESP12E.



Fonte: Autoria Própria.

As características apresentadas acima demonstram que a placa NodeMCU é adequada para utilização em projetos que necessitam de baixo consumo de energia elétrica e conectividade. Suas 13 GPIOs podem ser utilizadas para controle de circuitos externos ou para leituras de sensores digitais. O único inconveniente é o fato de possuir uma única entrada ADC, embora essa limitação possa ser contornada pela utilização de um circuito multiplexador/demultiplexador, permitindo ampliar a quantidade de sensores analógicos lidos.

Informações sobre a designação de cada pino do NodeMCU e suas funções podem ser encontradas em [NodeMCU \(2018\)](#).

### 3.2.1.2 Coleta de informações de irradiância solar

Para que o sistema de monitoramento possa ter uma referência dos níveis de irradiância solar que incidem na localidade da instalação FV monitorada, optou-se pela construção de um piranômetro próprio, capaz de quantificar a irradiância solar global. Essa escolha visou facilitar a medição dos valores de irradiância a cada segundo, pelo sistema de monitoramento proposto, e de forma integrada. Além disso, a recorrência, na literatura científica, de trabalhos demonstrando a viabilidade da construção de um piranômetro próprio foi outro ponto favorável. Alguns dos trabalhos que tratam sobre o tema são apresentados pelos seguintes pesquisadores: Zanesco (1991), Freire (2008), Naziazeno (2009), Bolzan (2014) e Gerhke (2016). Nesses trabalhos, os autores utilizam materiais semicondutores como elementos sensores para quantificar a irradiação solar.

Para a construção do piranômetro próprio utilizado no presente projeto e que o seu elemento sensor pode ser visto na Figura 27, foi tomado como referência o trabalho desenvolvido por Bolzan (2014).

Figura 27 – Sensor do piranômetro construído.



Fonte: Autoria Própria

Bolzan (2014) utilizou, em seu trabalho, um fotodiodo infravermelho como elemento sensor para quantificar a irradiância solar global. Após comparações, ajustes e testes, o piranômetro desenvolvido pelo autor apresentou uma correlação de  $9,751 \times 10^{-1}$  e uma incerteza associada a cada única medida (MAGE) de  $1,103 \times 10^{-2}$ .

O piranômetro desenvolvido para este sistema de monitoramento é formado por

três partes componentes básicas:

- Sensor - responsável por converter a irradiação solar global em tensão elétrica;
- Placa de processamento - responsável por converter o nível de tensão entregue pelo sensor em nível de irradiação solar;
- Armazenamento remoto de dados - os dados coletados são enviados através de rede sem fio para armazenamento em um RPi.

Para construção do corpo do sensor foi utilizado uma luva de alumínio fundido, de diâmetro de 1.1/4". Esse componente foi adaptado para esse fim, considerando que geralmente o mesmo é fabricado para conexão de eletrodutos rígidos em instalações elétricas aparentes. Após usinagem mecânica, foi alojada em uma das extremidades da luva, um difusor de *nylon* de 10 mm de espessura. Na outra extremidade foi introduzido um tampão de PVC. No interior do corpo do sensor foi acondicionado um fotodiodo infravermelho modelo TSAL6200, com o topo de seu encapsulamento posicionado perpendicular à face do difusor e distante deste cerca de 10 mm. Os terminais do fotodiodo foram conectados através de cabo blindado a uma placa NodeMCU ESP-12E, sendo que o seu catodo foi conectado a entrada analógica A0 da placa e o seu anodo ao terminal GND. Mais informações sobre o fotodiodo utilizado podem ser obtidas no Anexo A.

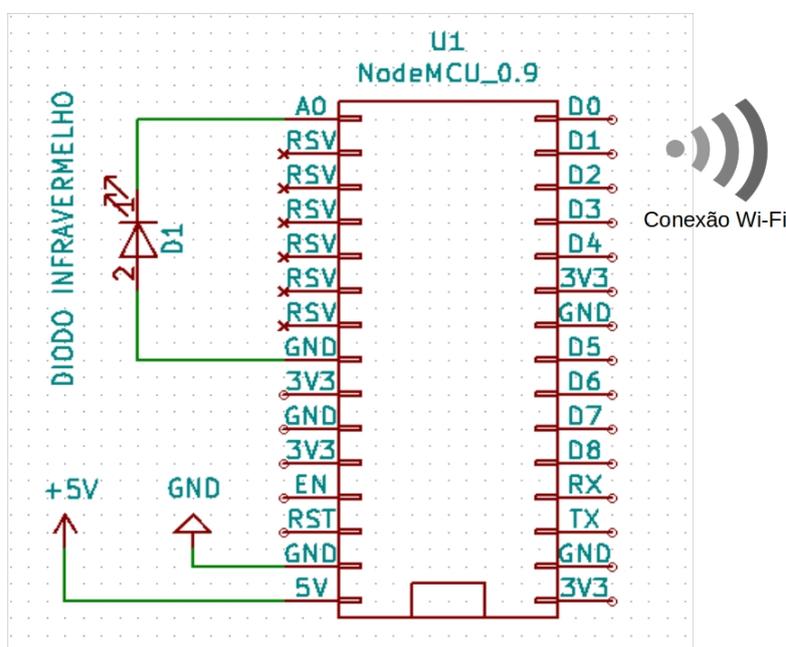
Inicialmente foi conectado um resistor *shunt* em paralelo com o fotodiodo, como recomendado por Bolzan (2014) e Haag (2007). No entanto, durante o processo de construção, o piranômetro proposto obteve melhor resposta a incidência solar quando não utilizado esse resistor.

O NodeMCU foi programado para processar os valores de tensões lidos pela sua entrada A0, convertê-los em valores de irradiância ( $W/m^2$ ) e se conectar à rede *Wi-Fi* utilizada. Os dados coletados são transmitidos através do protocolo MQTT, para publicação no MQTT *Broker* instalado no RPi. No RPi os dados são processados e salvos pelo sistema de monitoramento em um arquivo de texto, a uma taxa de uma linha de dados por segundo. No arquivo são escritos a hora da gravação do dado e o valor de irradiância medida.

Na Figura 28 são apresentados, de forma esquemática, os componentes constituintes do piranômetro e suas conexões. Na mesma, também é possível notar que a placa foi alimentada através dos pinos de 5V e GND. Essa alimentação foi realizada através de fonte CA/CC de 220/5V conectada à rede elétrica do prédio.

Para gravação do programa no NodeMCU foi utilizada a Arduino IDE, configurada para suportar a comunicação e programação desse tipo de placa de desenvolvimento. No Apêndice A são apresentadas mais informações sobre o algoritmo desenvolvido na Arduino IDE e gravado no NodeMCU.

Figura 28 – Componentes eletrônicos constituintes do piranômetro construído e suas conexões.



Fonte: Autoria Própria

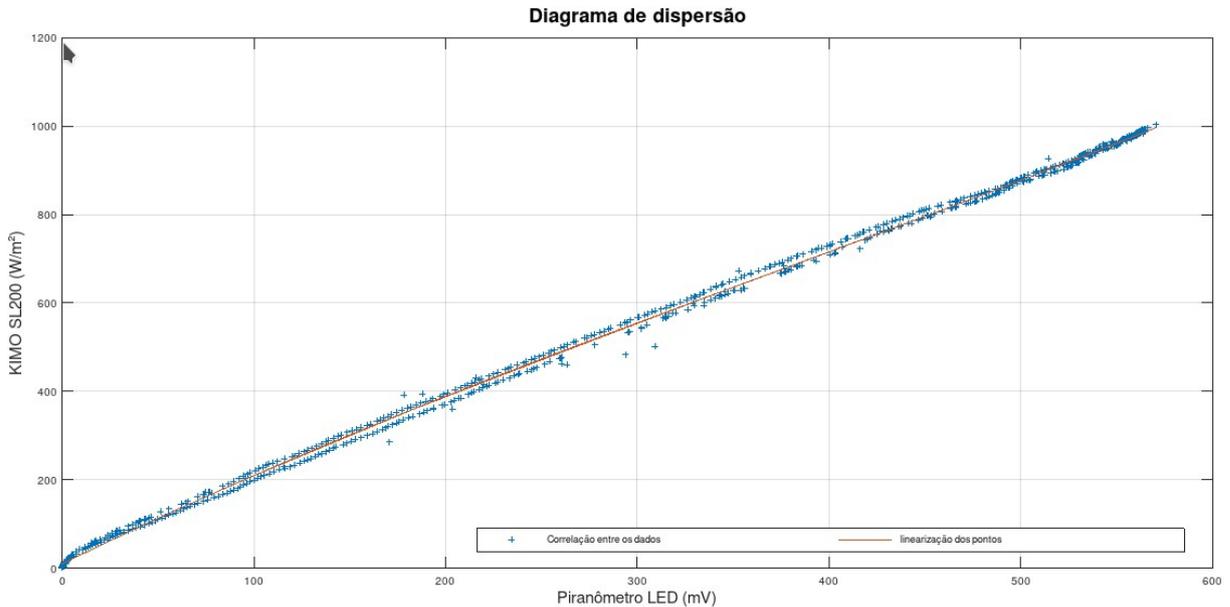
Após os ajustes necessários, o piranômetro foi testado em campo ao lado de um piranômetro comercial da marca/modelo KIMO/SL-200, que foi tomado como padrão para efeito de comparação e calibração. Esse piranômetro tem uma faixa de medição de  $1 \text{ W/m}^2$  a  $1300 \text{ W/m}^2$  e uma acurácia de 5 %. O *Data Sheet* do piranômetro KIMO/SL200 pode ser consultado no Anexo B.

Os dados coletados pelo dois componentes foram confrontados através do *software* matemático *GNU Octave*. Através desse *software* foi verificada a correlação entre os dados coletados pelo dois equipamentos e obtida a equação que melhor descreve a resposta do piranômetro proposto à irradiância solar. No Apêndice A são apresentadas mais informações sobre o algoritmo utilizado.

Na Figura 29 é apresentado o diagrama de dispersão dos dados coletados pelos dois equipamentos no dia 14 de setembro de 2018, das 05:00 às 19:00 horas. Nele são representado por “+”, na cor azul, a correlação entre os dados do piranômetro construído e o KIMO/SL-200, e por uma reta, na cor vermelha, a linearização dos pontos do piranômetro construído. O coeficiente de correlação entre os dados é de  $9,9905 \times 10^{-1}$ .

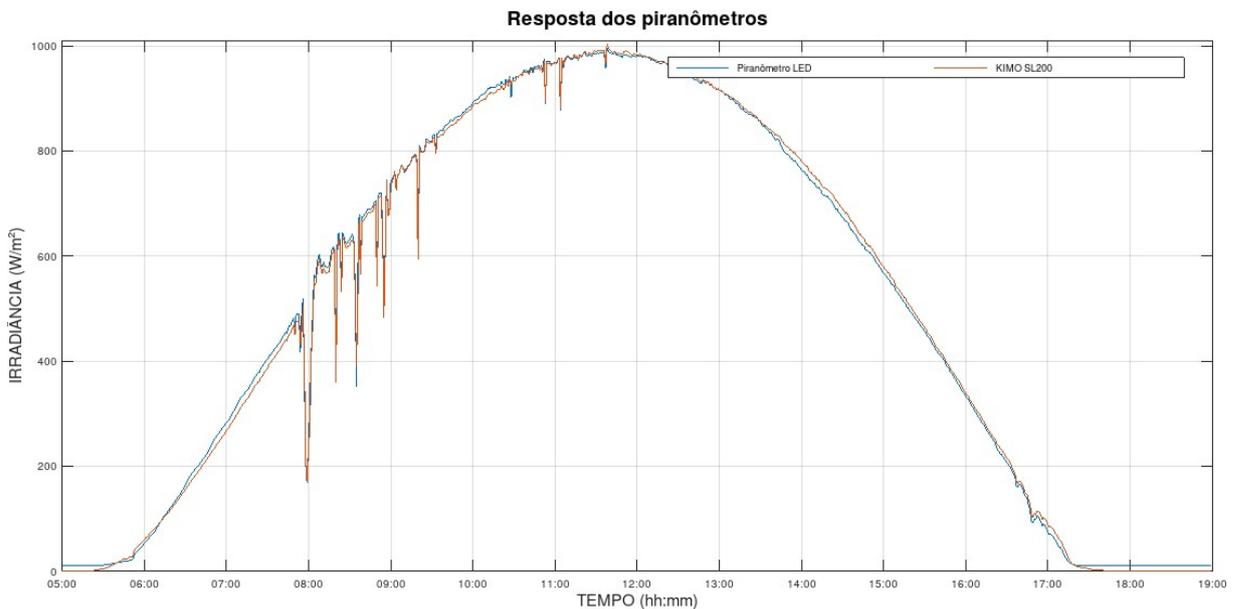
Na Figura 30 são apresentadas as resposta dos dois piranômetros para o período acima mencionado. Na figura citada, a curva na cor azul representa a resposta do piranômetro construído para o sistema de monitoramento e a curva de cor vermelha, a resposta do piranômetro KIMO/SL-200.

Figura 29 – Diagrama de dispersão dos dados coletados pelos dois equipamentos no dia 14 de setembro de 2018, das 05:00 às 19:00 horas.



Fonte: Autoria Própria

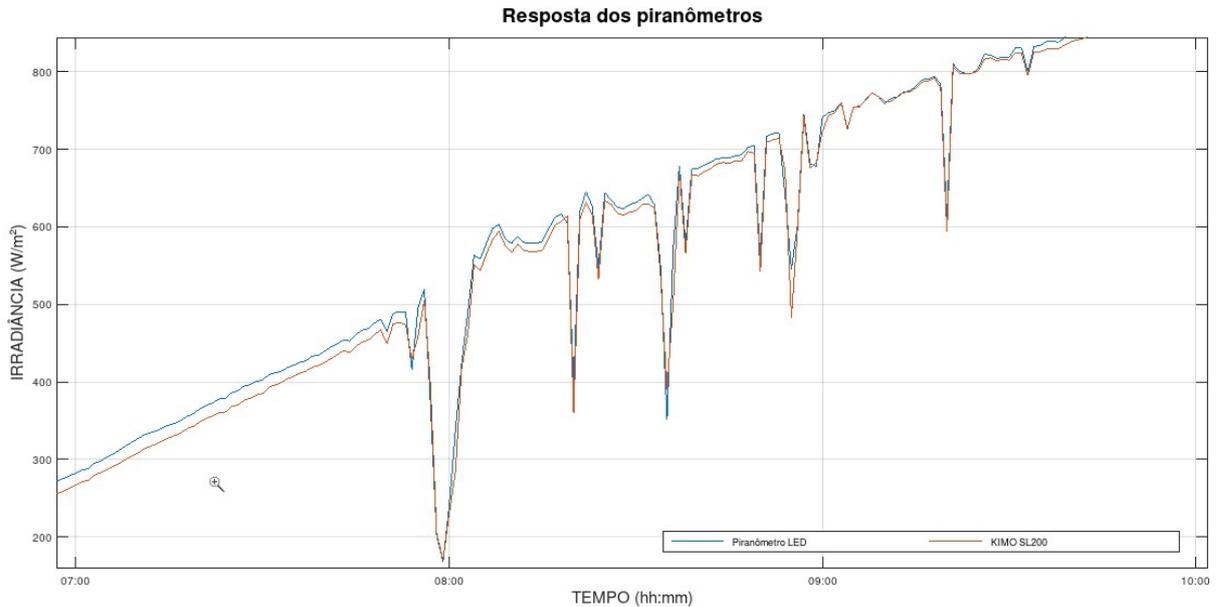
Figura 30 – Irradiação solar global coletada no dia 14 de setembro de 2018 pelos piranômetros próprio e KIMO/SL-200.



Fonte: Autoria Própria

Para uma melhor visualização das respostas dos piranômetros, são apresentadas ampliações de áreas específicas da Figura 30 nas Figuras 31, Figura 32 e Figura 33. Na Figura 31 é apresentada uma ampliação focando em período de maior nebulosidade, ocorrido por volta do horário de 08h30min.

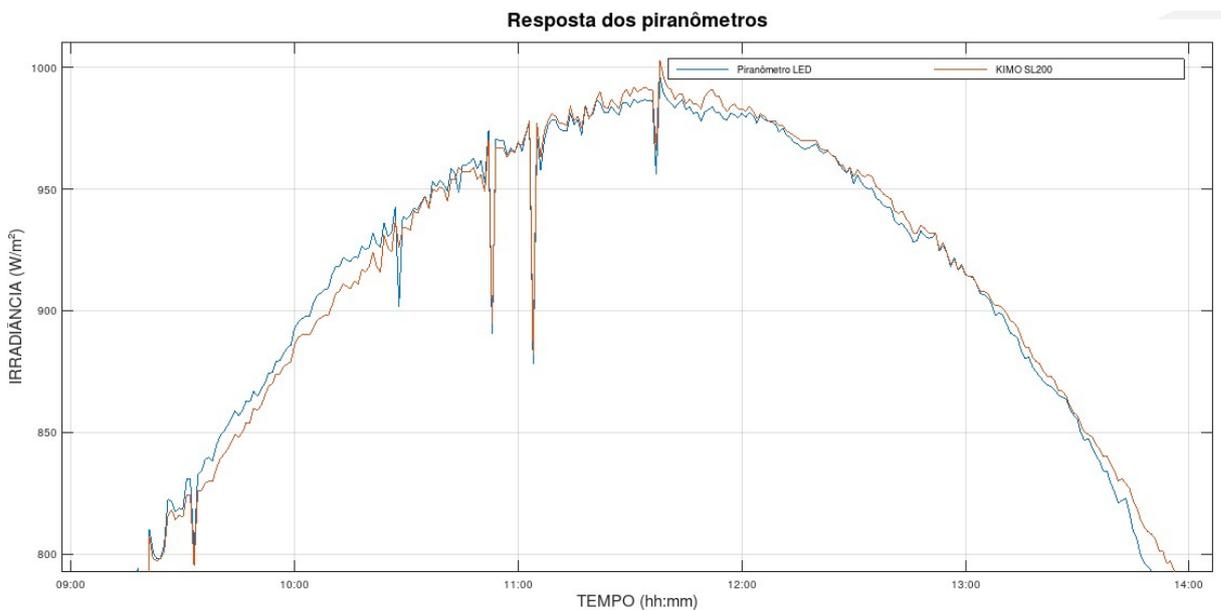
Figura 31 – Irradiação solar global coletada no dia 14 de setembro de 2018, pelos piranômetros próprio e KIMO/SL-200, no período de maior nebulosidade.



Fonte: Autorial Própria

A Figura 32 foca no período de maior irradiação solar, que é compreendido entre os horários das 09 horas às 14 horas.

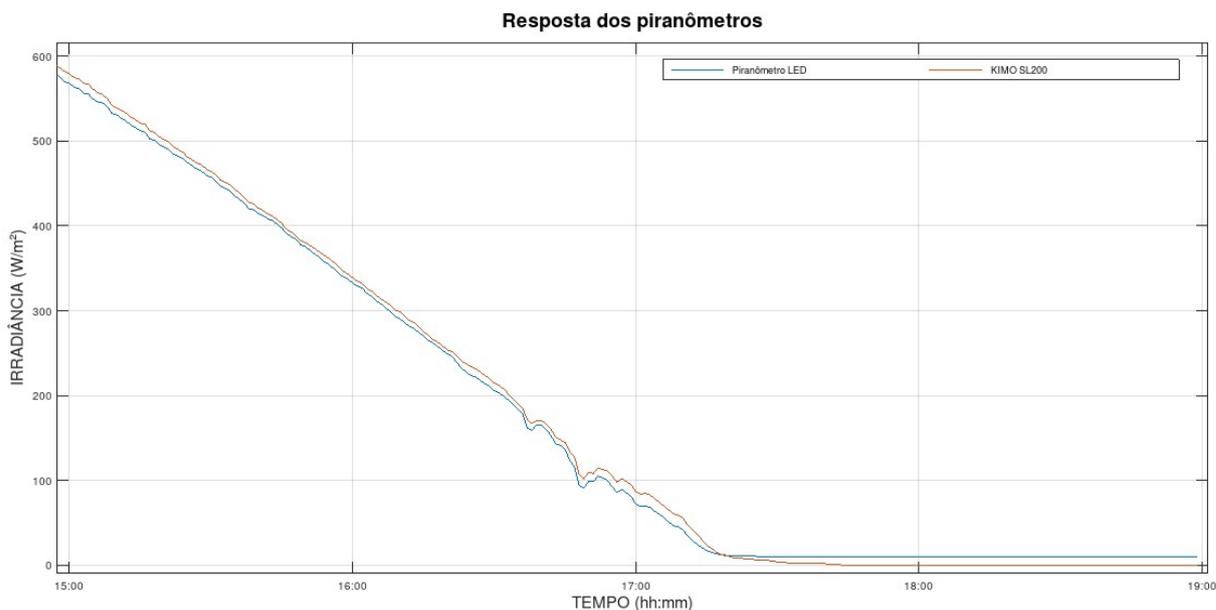
Figura 32 – Irradiação solar global coletada no dia 14 de setembro de 2018 pelos piranômetros próprio e KIMO/SL-200, no período de 09:00 h às 14:00 h



Fonte: Autorial Própria

Na Figura 33 é visualizada a resposta dos piranômetros no período final do dia.

Figura 33 – Irradiação solar global coletada no dia 14 de setembro de 2018 pelos piranômetros próprio e KIMO/SL-200, no período de 15:00 h às 19:00 h



Fonte: Autoria Própria

Ao analisar as Figuras 31, Figura 32 e Figura 33 fica evidente que o piranômetro construído apresentou pequenas discrepâncias em suas medições em relação ao piranômetro tomado como padrão, pois durante a manhã os valores medidos foram superestimados, enquanto à tarde foram subestimados. Esse erro, também relatado no trabalho de Bolzan (2014), provavelmente foi causado por imprecisão no nivelamento do elemento sensor durante o processo de medição. Além disso, através da Figura 33 percebe-se um erro de *off-set* de cerca de 10  $W/m^2$ , observado no amanhecer e entardecer.

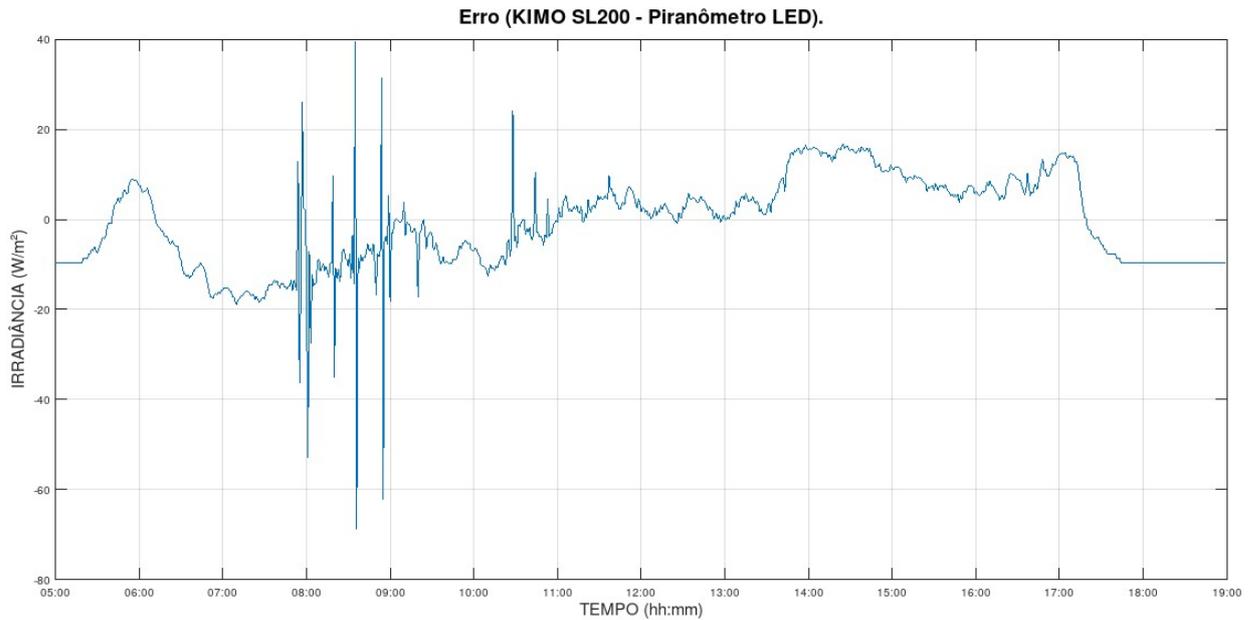
Para uma melhor visualização dos erros relatados acima é apresentado na Figura 34 o gráfico de erros do piranômetro LED em relação ao KIMO/SL-200. Neste gráfico é apresentada a diferença entre os valores medidos pelo piranômetro KIMO SL-200 e os valores obtidos pelo protótipo, em 14 de setembro de 2018.

Na Figura 35 é apresentado o gráfico de erros do piranômetro LED em relação ao KIMO/SL-200 em valores percentuais dos dados coletados em 14 de setembro de 2018.

Analisando o gráfico apresentado na Figura 35, chegou-se à conclusão que o piranômetro desenvolvido apresenta erros percentuais elevados quando os níveis de irradiação solar são baixos, como, por exemplo, ao amanhecer e entardecer do dia. Além disso, a ocorrência de nebulosidade, como pode ser observado por volta das 08:30 horas, aparenta afetar a precisão do mesmo. No entanto, em medições no modo instantâneo (segundo a segundo), em período de nebulosidade o erro percentual entre os dois piranômetros ficou em torno de 5%.

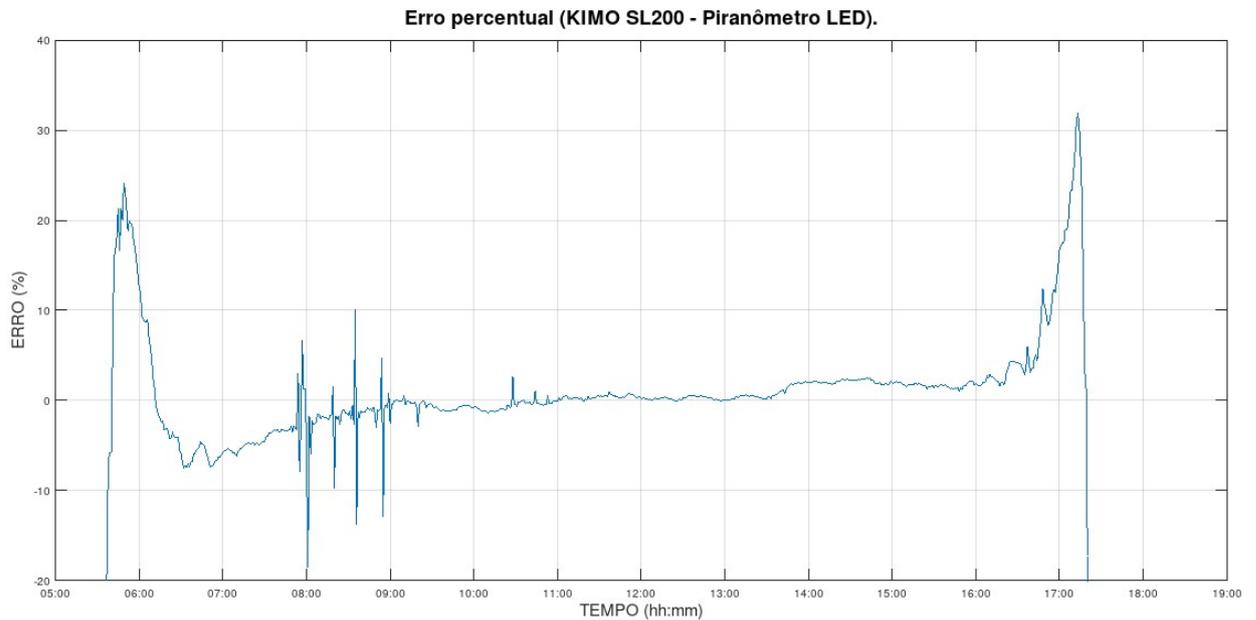
Apesar de o piranômetro desenvolvido não responder com a mesma precisão à

Figura 34 – Gráfico de erros de medição do piranômetro LED em relação ao KIMO/SL-200.



Fonte: Autoria Própria

Figura 35 – Gráfico de erros de medição do piranômetro LED em relação ao KIMO/SL-200 em valores percentuais.



Fonte: Autoria Própria

incidência da irradiância solar quando comparado ao piranômetro comercial tomado como padrão, o mesmo é sensível à variação da intensidade da irradiância solar. Essa sensibilidade foi utilizada neste trabalho para se ter uma referência aproximada da incidência solar ao nível do SMGFV.

### 3.2.1.3 Coleta de informações de tensão e corrente

Para a aquisição de informações sobre os níveis de tensão e corrente na entrada do inversor e os que são entregues à rede, foi desenvolvido um circuito eletrônico que auxilia uma placa NodeMCU ESP-12E no processo de leitura dos sensores. As informações coletadas pelo NodeMCU são enviadas através de uma rede *Wi-Fi* para publicação no *Broker* MQTT instalado no RPi. O sistema de monitoramento instalado no RPi é responsável por processar e armazenar esses dados.

A sua confecção possibilitou a leitura de dois sensores de corrente e dois sensores de tensão pela única entrada ADC do NodeMCU. Além disso, esse circuito eletrônico possibilita a fácil conexão entre sensores e NodeMCU, evitando eventuais falhas e interferência na comunicação.

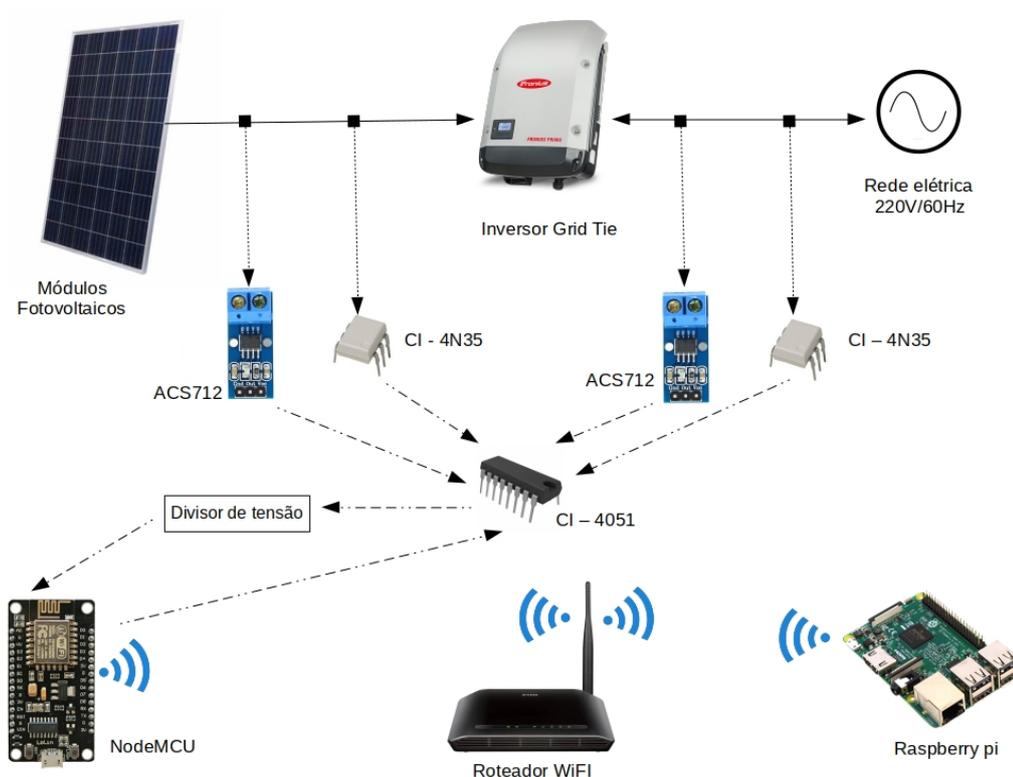
Quando em funcionamento o conjunto NodeMCU e placa segue a seguinte sequência de passos para coletar dados do SMGFV:

- Alimentando-se a placa o NodeMCU se auto configura e se conectada a rede Wi-Fi utilizada pelo sistema de monitoramento.
- Em seguida o NodeMCU seleciona qual o sensor será lido naquele momento enviando informações de controle a um CI demultiplexador/multiplexador. Dependendo do sinal de controle recebido, o CI seleciona a entrada a qual o sensor pretendido está conectado e envia o sinal recebido para a sua saída. O sinal proveniente da saída do CI passa por um divisor de tensão que reduz o nível de tensão a valores aceitáveis pela entrada ADC do NodeMCU.
- Após as leituras dos quatro sensores o NodeMCU processa as informações recebidas e as publica no MQTT *Broker* instalado no RPi. O sistema de monitoramento instalado no RPi lê, processa e salva essas informações em arquivo de texto a uma frequência de uma gravação por segundo.
- Após o sistema de monitoramento confirmar o recebimento correto dos dados, o NodeMCU reinicia o processo de seleção e leitura dos sensores. O ciclo de leitura dos sensores e publicação no MQTT *Broker* é realizado uma vez por segundo. O processo de leitura e envio de informações só é interrompido se a conexão *Wi-Fi* não for favorável ou se a placa for desligada.

Os componentes eletrônicos para a confecção da placa e os sensores utilizados encontram-se listados no Apêndice B.

Na Figura 36 são apresentados, de forma ilustrativa, os pontos de leituras onde foram conectados os sensores, alguns dos componentes constituintes da placa construída, os fluxos de energia elétrica e os fluxos de informações coletadas e enviadas.

Figura 36 – Ilustração dos componentes e fluxo de informações na placa de aquisição de dados de tensões e correntes.

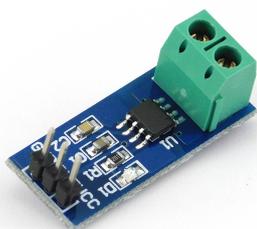


Fonte: Autoria Própria

Na Figura 36 é possível visualizar os componentes ACS712 e o CI - 4N35 que foram utilizados como sensores. Os sensores ACS712 ficaram responsáveis por detectar os níveis de correntes e os CI - 4N35, por quantificar os níveis de tensões. O CI - 4051 é o responsável por intermediar a conexão dos sensores com o NodeMCU.

Na Figura 37 é possível visualizar o componente ACS-712 utilizado para medir os valores de corrente elétrica.

Figura 37 – Sensor ACS712



Fonte: (ELECENA, 2018)

Segundo ALLEGRO (2017), o sensor ACS712 utilizado nesse projeto possui faixa

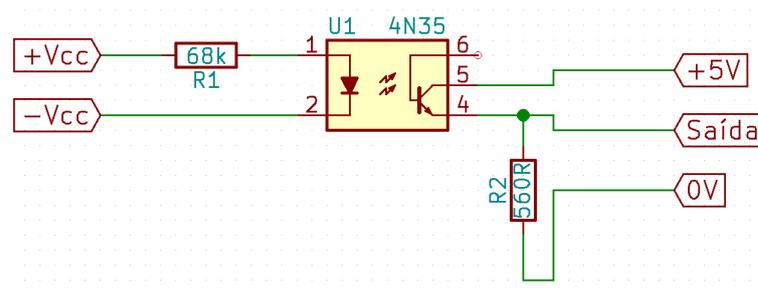
de medição entre -20A e +20A, um erro de saída de cerca 1,5 % a 25 °C e uma saída analógica que opera na faixa de tensão de 0(zero) a 5 Vcc. Possui também um isolamento elétrico de 2,1 kVrms, além de apresentar uma resposta linear à variação de corrente em seus terminais, sendo cada variação de 100 mV na saída equivalente a um ampere no circuito medido.

Para que fosse possível a realização de medições de tensão com um isolamento elétrico entre o circuito de geração e a placa de medição, foram adaptados CIs optoacopladores, modelo 4N35, como elementos sensores. Segundo Vishay (2010), em teste de isolamento elétrico o CI citado suporta até 5 kVrms.

Como o CI 4N35 não é projetado inicialmente para medição de nível de tensão, buscou-se utilizar a sua região de resposta linear, quando controlado o nível de corrente aplicado ao seu Diodo Emissor de Luz (LED) infravermelho interno. Para isso foram realizados experimentos buscando encontrar um valor de resistência elétrica, que colocada em serie com o LED interno, pudesse limitar a resposta de saída do CI à uma região aproximadamente linear. Essa resistência deveria limitar a corrente elétrica fornecida ao LED a valores seguros para a tensão aplicada aos seus terminais, limitada, nesse caso, até 500 V em CC.

Na Figura 38 é apresentado o esquema do circuito eletrônico do sensor de tensão contínua que, após realização de testes em bancada, foi adotado.

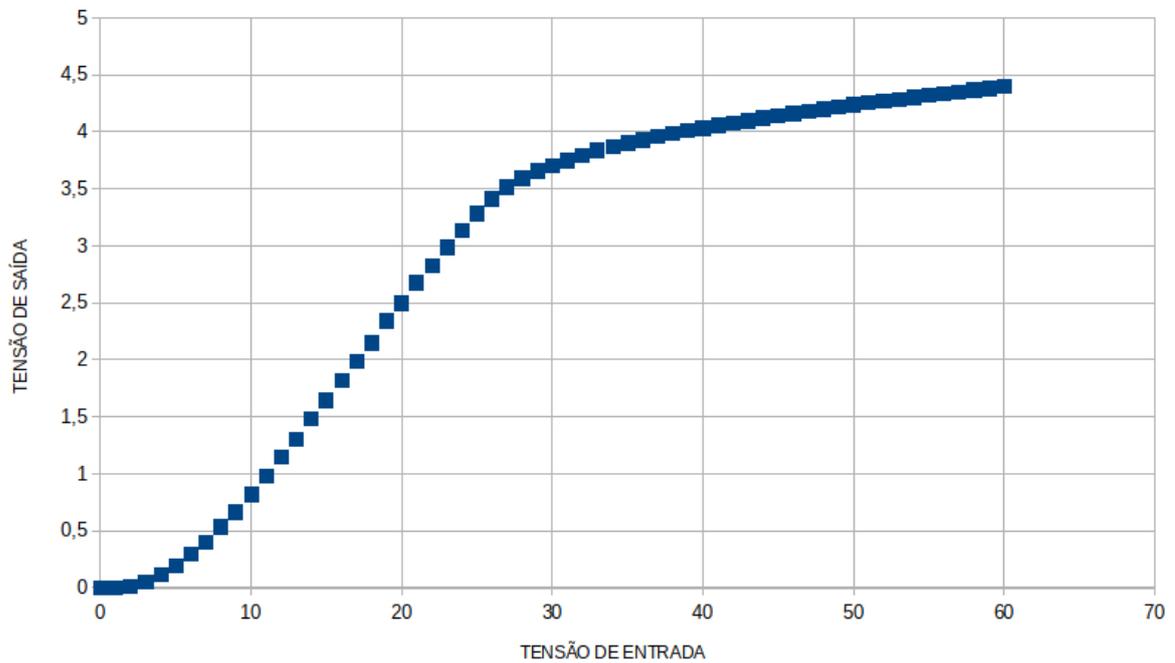
Figura 38 – Sensor de tensão contínua



Fonte: Autoria Própria

Para que fosse possível a realização do teste em bancada para verificação da resposta do circuito proposto, o resistor R1 foi substituído por outro de valor 10 vezes menor, assim como alimentou-se com tensões 10 vezes menores, que estavam numa faixa de 0 V a 60 V. Na Figura 39 é apresentada a curva de resposta do circuito.

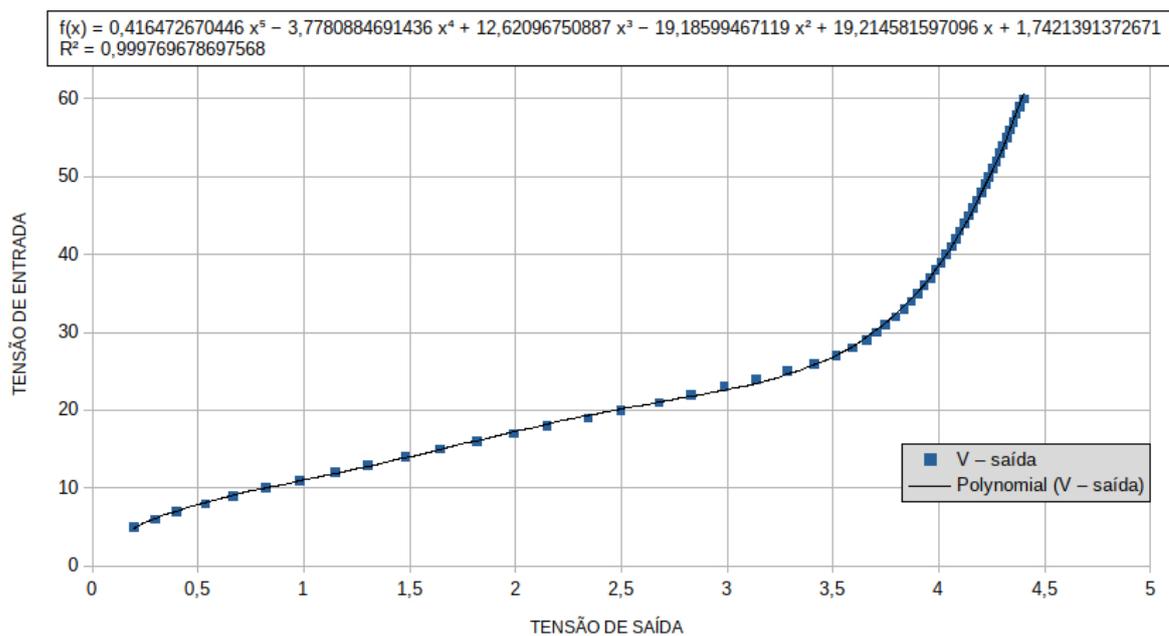
Figura 39 – Curva de resposta do circuito proposto.



Fonte: Autoria Própria

Através do uso de interpolação polinomial, a curva acima foi utilizada para a obtenção de uma equação que calculasse a tensão medida em virtude da tensão de saída do circuito. Essa equação foi implementada na programação e obteve uma resposta aproximada para a leitura de tensão. Na Figura 40 é apresentada a curva e a equação obtida.

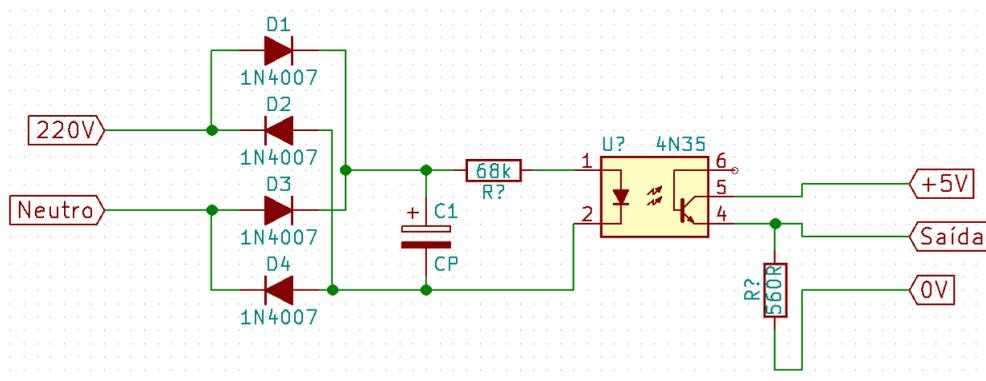
Figura 40 – Curva utilizada para a obtenção da equação do cálculo da tensão de entrada.



Fonte: Autoria Própria

Para a utilização desse sensor em medições de tensão alternada, foi adicionado um circuito retificador em ponte e uma filtragem aos terminais de entrada da placa. A configuração do sensor citado pode ser visualizada na Figura 41. O mesmo foi utilizado no entanto apenas para verificação do fornecimento de energia elétrica alternada.

Figura 41 – Sensor de tensão alternada



Fonte: Autoria Própria

As saída dos sensores de corrente e de tensão são conectadas diretamente nas entradas do CI 4051, onde, dependendo do sinal de comando recebido, um dos sensores é escolhido e terá o seu valor de saída enviado para leitura no NodeMCU. No Apêndice B é mostrado o esquema eletrônico da interligação entre o NodeMCU, o CI4051 e as saídas dos sensores.

Os dados coletados pelo NodeMCU são salvos em arquivo de texto, pelo sistema de monitoramento instalado no RPi, a uma frequência de uma linha de texto por segundo. No arquivo de texto ficam salvos o instante da leitura e os valores coletados. Para gravação do programa no NodeMCU foi utilizada a Arduino IDE. No Apêndice B são apresentadas mais informações sobre o código fonte desenvolvido.

#### 3.2.1.4 Coleta de informações de temperatura dos MFVs

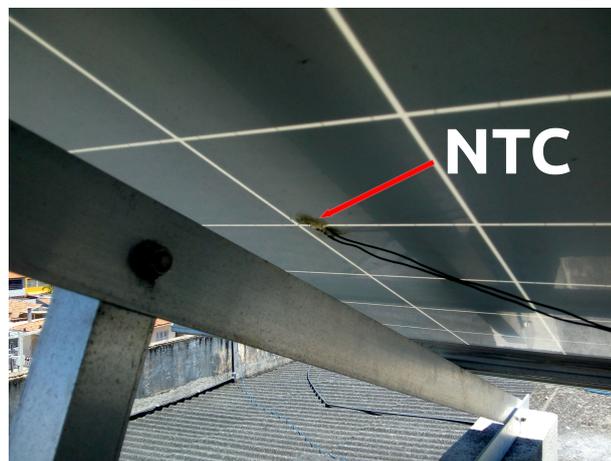
Para o monitoramento das temperaturas de funcionamento dos MFVs, foram desenvolvidas duas placas eletrônicas idênticas para auxiliar dois NodeMCU ESP-12E na aquisição de dados. Cada placa tem por finalidade possibilitar o monitoramento de até oito pontos de temperaturas. Os dados coletados pelos NodeMCUs são publicados no *Broker* MQTT instalado no RPi.

O sistema de monitoramento instalado no RPi se encarrega de ler os dados publicados no *Broker* MQTT e salvá-los em arquivo de texto a uma frequência de uma linha de texto por segundo. Nesse arquivo de texto são salvos o instante da gravação, a temperatura da caixa de diodos de *bypass* de cada módulo e a temperatura média do conjunto de MFVs.

Como elementos sensores para a medição das temperaturas, foram utilizados termistores NTC (*Negative Temperature Coefficient*) de 10 k $\Omega$ . Esses sensores foram fixados nas faces traseiras dos MFVs e nas caixas de diodos de *bypass*.

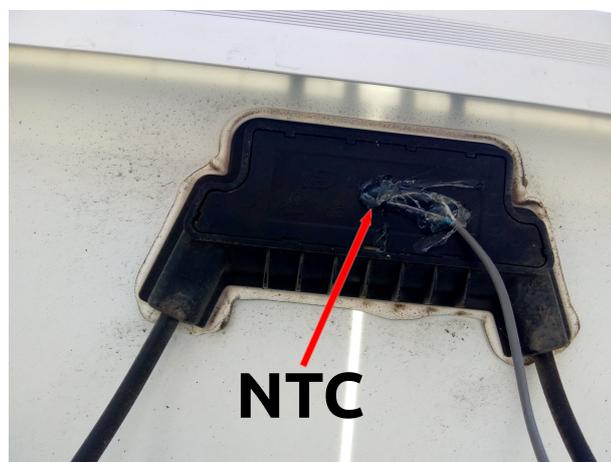
Na Figura 42 pode ser visto um termistor NTC fixado na face traseira de um dos MFVs do SMGFV monitorado e na Figura 43, um termistor NTC fixado na caixa de diodos de *bypass* de um dos MFVs. .

Figura 42 – Termistor NTC fixado na face traseira de um dos MFVs do SMGFV monitorado.



Fonte: Aatoria Própria

Figura 43 – Termistor NTC fixado na caixa de diodos de *bypass* de um dos MFVs do SMGFV monitorado.



Fonte: Aatoria Própria

A fixação dos termistores NTC nos MFVs foi realizada através de cola quente

e os terminais dos mesmos foram conectados a cabos elétricos que, por sua vez, foram levados às placas de aquisição de dados de temperaturas. Os itens abaixo descrevem o funcionamento dessa placa de aquisição:

- Ao energizar a placa, o NodeMCU se auto configura e se conecta à rede *Wi-Fi*;
- A seguir, seleciona qual o sensor será lido, enviando comandos através de três de suas saídas digitais para um CI multiplexador/demultiplexador;
- As leituras das temperatura são realizadas através da medição de tensão resultante em cada divisor de tensão, formado entre resistores de  $10k\Omega$  e os termistores;
- As tensão, ao serem lidas pelo NodeMCU, são convertidas em temperaturas e enviadas através de conexão *Wi-Fi* para publicação no *broker* MQTT.
- Somente após a confirmação de recebimento enviada pelo sistema de monitoramento, o ciclo de leituras dos sensores e envio de dados recomeça. A publicação no *broker* MQTT é realizada uma vez a cada segundo. O processo só é finalizado se a placa for desligada, se a conexão entre a placa e o *broker* MQTT for interrompida ou se a *Wi-Fi* não oferecer condição de envio.

Os componentes eletrônicos utilizados, os sensores, o esquema eletrônico da placa e o código fonte desenvolvido na IDE Arduino para as placas são apresentados no Apêndice C.

### 3.2.2 Computação - Raspberry Pi

Para o armazenamento e processamento dos dados coletados pela placas de aquisições, foi utilizado um mini computador Raspberry Pi (RPi) 3, modelo B, executando o sistema operacional Linux *RASPBIAN STRETCH* kernel 4.14. O sistema operacional foi instalado num cartão micro SD, Classe 10, utilizado como memória ROM do RPi e seguindo as instruções descritas por [RASPBERYPi \(2018a\)](#). Suas especificações técnicas são as seguintes:

- Processador Broadcom BCM2837, 64bits ARMv8 Cortex-A53 Quad-Core
- Clock 1.2 GHz;
- Memória RAM: 1GB;
- Adaptador Wi-fi 802.11n integrado;
- Bluetooth 4.1 BLE integrado;
- Conector de vídeo HDMI;

- 4 portas USB 2.0;
- Conector Ethernet;
- Interface para câmera (CSI);
- Interface para display (DSI);
- Slot para cartão microSD;
- Conector de áudio e vídeo;
- GPIO de 40 pinos;
- Dimensões: 85 x 56 x 17mm.

Na Figura 44 é mostrado o RPi utilizado.

Figura 44 – Raspberry Pi 3, modelo B



Fonte: ([RASPBERRYPI, 2018b](#))

A alimentação elétrica do RPi foi realizada através de uma fonte de 3 A, micro USB, como recomendado pelo fabricante e para dissipação do calor gerado pelos processadores da placa, foram utilizados dois radiadores específicos para uso em RPi.

Optou-se pela não utilização de monitor e teclado diretamente conectados ao RPi, para se evitar os custos provenientes da aquisição desses componentes. A sinalização sonora do funcionamento dos aplicativos executados é realizada por um buzzer conectado em uma de suas saídas digitais. A conexão com a internet foi realizada através da rede *Wi-Fi*, evitando, dessa forma, a conexão de um cabo de rede.

Para configurações e acesso remoto ao RPi, foi utilizado o aplicativo RealVNC, que já vem incluso no sistema operacional *RASPBIAN STRETCH* e que foi instalado em *notebook* pessoal. Esse aplicativo utiliza a tecnologia VNC (Virtual Network Computing) para permitir o acesso ao sistema operacional a visualização de interfaces gráficas. Além disso, permite o acesso e controle do RPi de forma local ou remota através de uma conexão segura.

Após instalação e configuração do sistema operacional no RPi, foram instalados dois *softwares* para facilitar o desenvolvimento do sistema de monitoramento pretendido, que foram:

- Eclipse Mosquitto - *Broker* MQTT de código aberto. Neste projeto, atua como intermediário na comunicação entre os sensores e o sistema supervisor.
- Node-Red - Ferramenta de programação baseada em fluxo, utilizada para facilitar o desenvolvimento da interface gráfica e do sistema de monitoramento.

### 3.2.3 Rede de comunicação

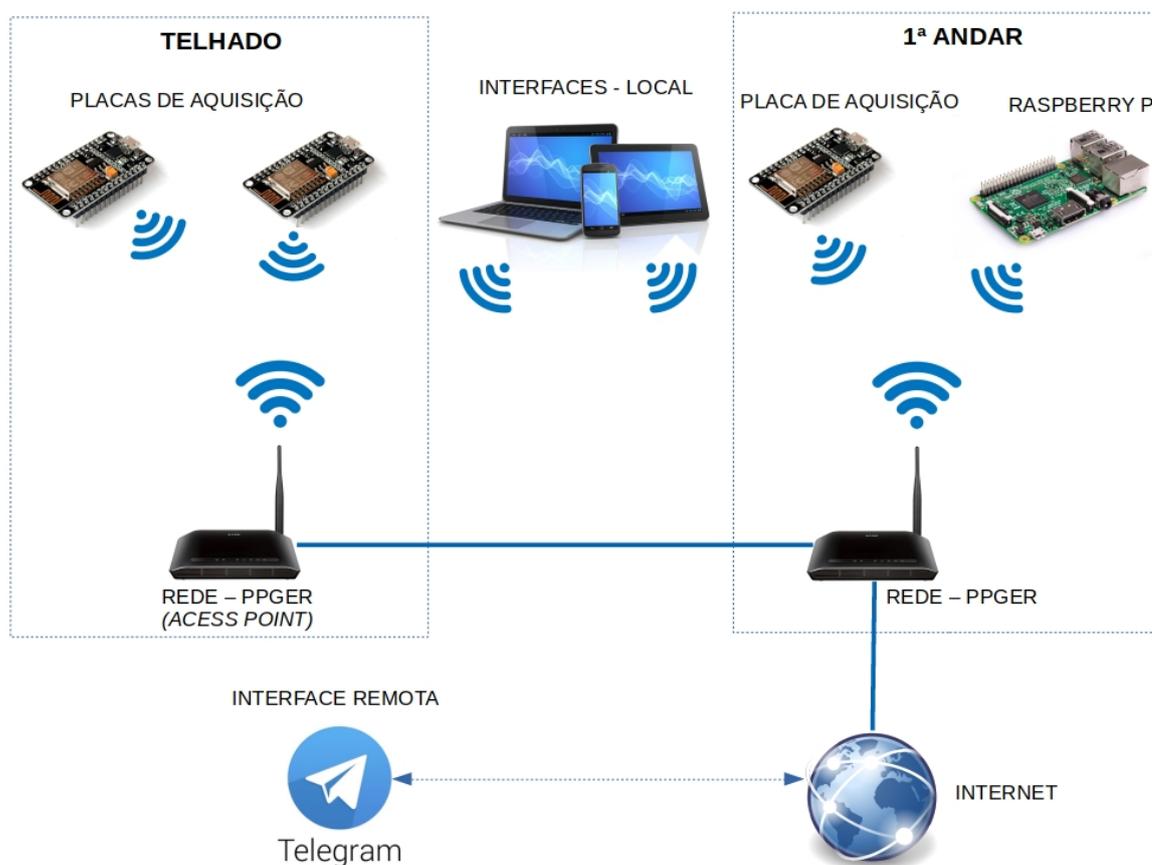
Foi necessário construir uma rede *Wi-Fi* com acesso à internet para permitir conectar entre si as placas de aquisição e o RPi, prover acesso ao usuários do SMGFV à interface gráfica local do sistema de monitoramento e distribuir internet.

Para sua construção foram utilizados dois roteadores, pois as placas de monitoramento e o RPi encontram-se em locais distintos, sendo que apenas um roteador não conseguiu prover um alcance satisfatório de sinal *Wi-Fi*. Um deles encontra-se localizado no primeiro andar do prédio, sendo responsável por disponibilizar sinal *Wi-Fi* para o inversor, para a placa de aquisição de dados de corrente e tensão, para o RPi e para eventuais dispositivos eletrônicos do usuário. O segundo roteador foi configurado para funcionar como *access point* e encontra-se instalado no telhado do prédio, tendo como função aumentar o alcance do sinal *Wi-Fi*, facilitando a conexão das placas de aquisições de temperatura e de irradiância localizadas no telhado.

Na Figura 45 é apresentada, de forma ilustrativa, a rede descrita acima e os componentes conectados à ela.

Na figura são representados também, exemplos de equipamentos eletrônicos que podem ser utilizados para o acesso à interface local do sistema de monitoramento; além do serviço de mensagem Telegram, baseado em nuvens, utilizado para acesso à interface gráfica remota. Essas duas interfaces são detalhadas na seção seguinte.

Figura 45 – Imagem ilustrativa da rede criada e dos componentes conectados



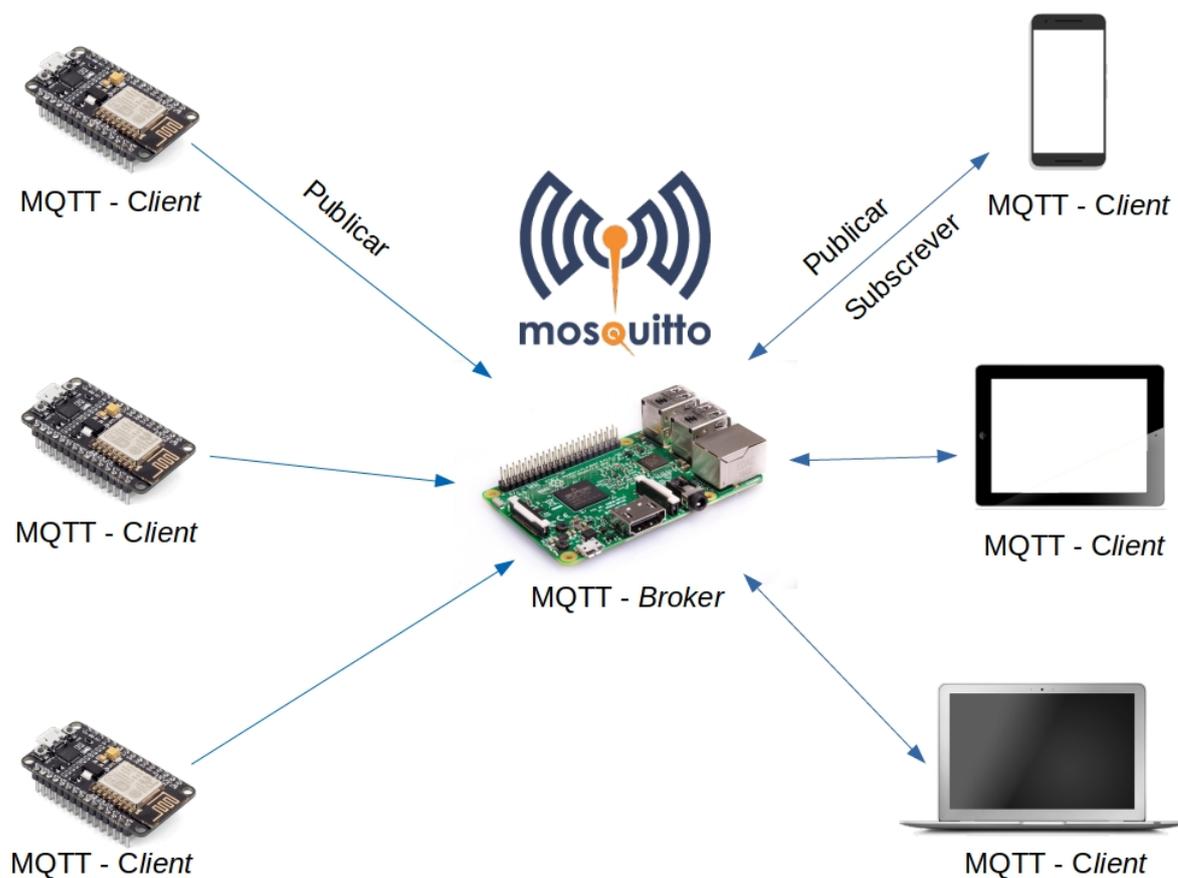
Fonte: Autoria Própria

Para a comunicação entre os dispositivos do sistema de monitoramento através dessa rede, foi utilizado o protocolo de comunicação MQTT. Na Figura 46 está representada a comunicação entre os dispositivos integrantes da rede através do protocolo MQTT. Nela é indicado que MQTT-*Clients* (clientes MQTT) publicam e se inscrevem no MQTT-*Broker*, que é executado no RPi. Os MQTT-*Client* podem ser NodeMCUs, que somente publicam, ou dispositivos eletrônicos do usuário, que podem publicar ou se inscrever.

### 3.3 Sistema de monitoramento e detecção de falhas

O processamento, armazenamento e visualização de todos os dados que são publicados no *Broker* MQTT instalado no RPi são realizados através de uma aplicação desenvolvida com a ferramenta de programação Node-RED. Essa aplicação funciona em conjunto com um *bot*, executado em nuvens, que provê uma interface remota e armazenamento dos dados.

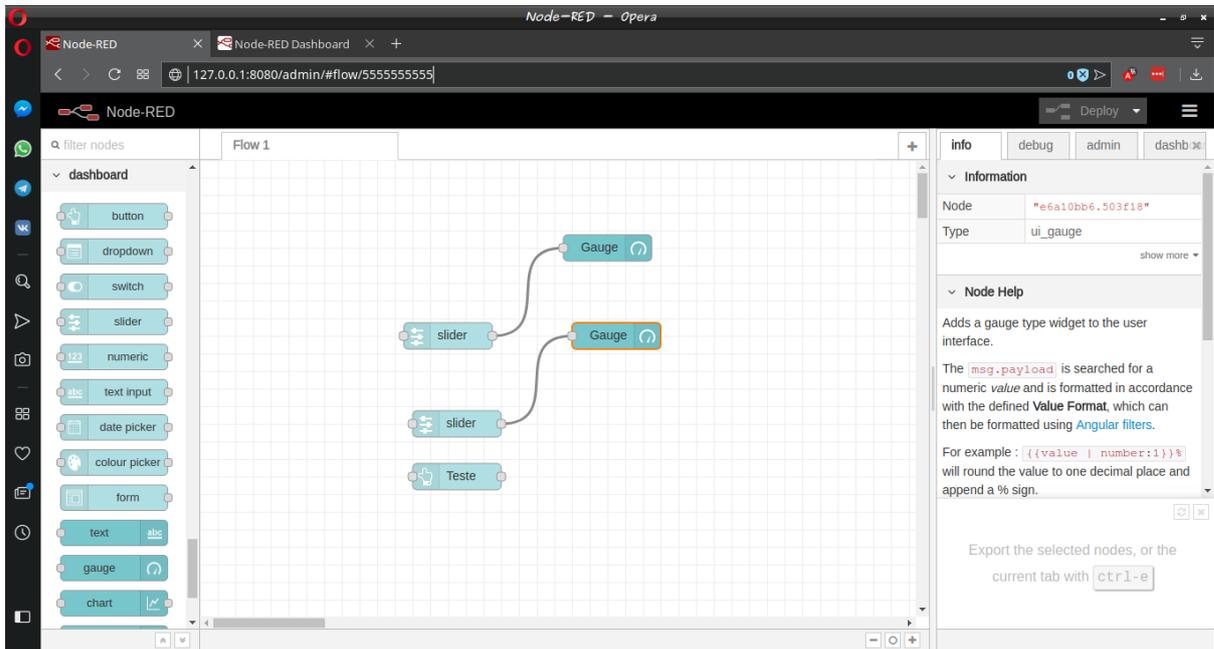
Figura 46 – Comunicação entre os dispositivos integrantes da rede através do protocolo MQTT.



Fonte: Autorial Própria

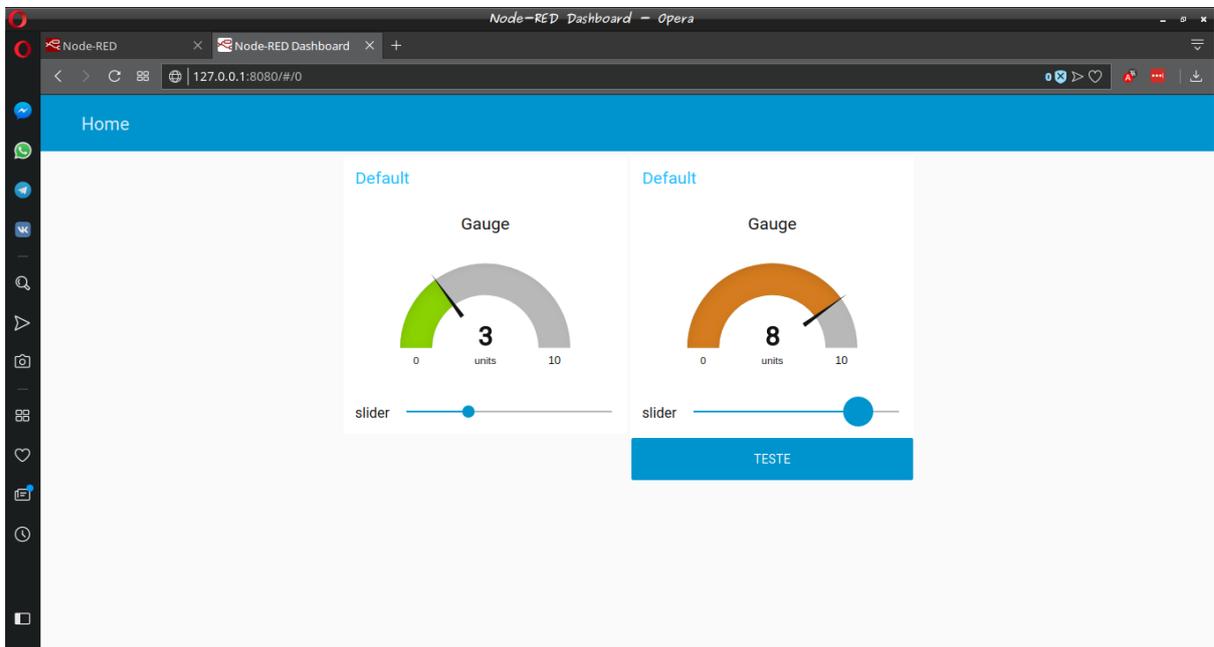
### 3.3.1 Monitoramento

A ferramenta Node-RED foi escolhida por ser uma ferramenta de programação de código aberto, que possibilita a integração de dispositivos, APIs (Application Programming Interface) e serviços online para construção de soluções de monitoramento e gerenciamento de forma fácil e rápida. Além disso, possui um editor visual baseado em blocos, executado diretamente em navegador *web*. Os blocos de código predefinidos, facilitam e agilizam o processo de programação, mas caso se deseje criar alguma função específica, existem blocos que aceitam a criação de funções pelo usuário. Na Figura 47 é possível visualizar o editor do Node-RED sendo executado em um navegador *web* e na Figura 48 é visualizada a execução de uma aplicação desenvolvida através dessa ferramenta.

Figura 47 – Visualização do editor do Node-RED sendo executado em um navegador *web*.

Fonte: Autoria Própria

Figura 48 – Visualização de uma aplicação desenvolvida através do Node-RED.



Fonte: Autoria Própria

A ferramenta foi instalada no RPi e configurada para ser iniciada e executada em segundo plano todas as vezes que o sistema operacional for iniciado. Utiliza como *interface* gráfica o navegador *web* de qualquer dispositivo eletrônicos que esteja conectado na mesma rede *Wi-Fi* que o RPi está conectado.

Para o desenvolvimento da aplicação e da *interface* gráfica local, foi utilizado principalmente o módulo *node-red-dashboard* do Node-RED. Sua função é possibilitar a visualização detalhada de todos os dados coletados através de *Dashboards*.

Para o acesso a essa interface, o usuário deve se conectar através de dispositivos eletrônicos (*smartphone, tablets, notebooks*) na rede *Wi-Fi* em que o RPi está conectado. Após a conexão, deve acessar, via navegador *web*, o endereço IP do servidor da interface gráfica que está armazenada no RPi. O endereço IP definido foi *192.168.0.33:8080*. Acessando esse endereço IP, o usuário terá acesso à tela inicial da interface e a partir daí poderá acompanhar detalhadamente o funcionamento do sistema de geração. Mais detalhes dessa interface estão disponíveis no Apêndice D.

Todas as informações referentes aos SMGFV disponibilizadas pelas interfaces são adquiridas através da leitura do *Broker* MQTT instalado no RPi, que recebe dados das placas de aquisição. As informações apresentadas pela interface acompanham cada atualização de dados do *Broker* MQTT.

O acesso remoto às informações do sistema de monitoramento é realizado através da interação do usuário com um *Chatbot*, implementado utilizando a biblioteca *node-red-contrib-chatbot* do Node-RED e a *Bot* API do Telegram. Esse *Chatbot* tem a finalidade de manter o usuário informado sobre os estados dos sistemas de microgeração através de envio automático de informações ou respondendo à requisições realizadas pelo usuário. Para o seu desenvolvimento, foi criado inicialmente um bot junto ao Telegram e a partir dele criado o *Chatbot* no Node-RED.

Para a criação do bot no Telegram foram seguidos os seguintes passos:

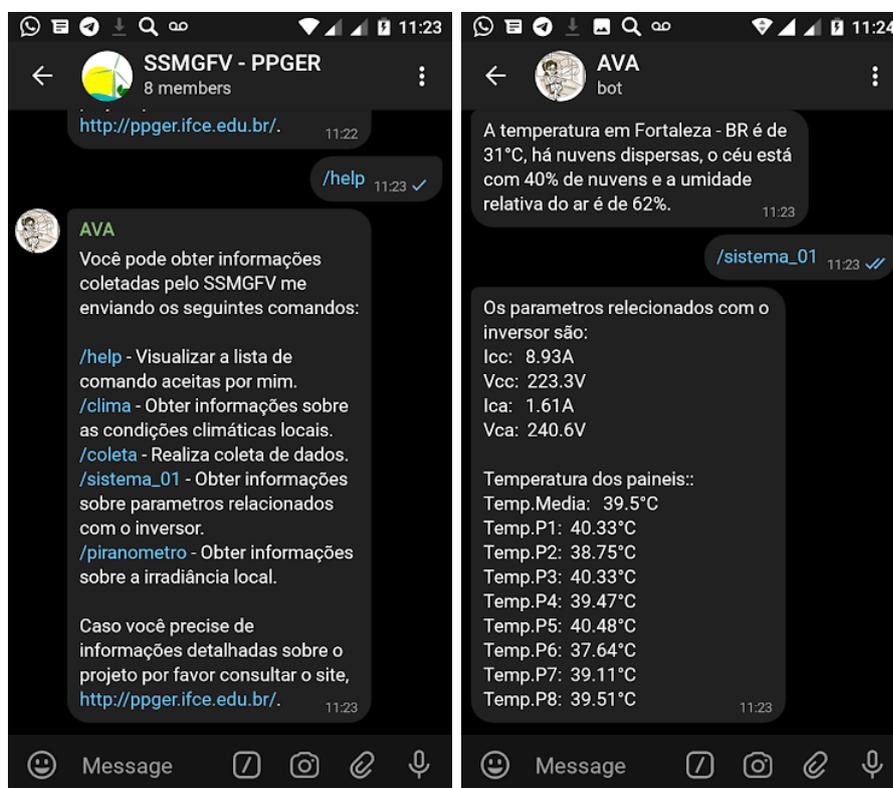
- Criação de uma conta de usuário no serviço de mensagem Telegram;
- Uso do bot @BotFather;
- A partir do @BotFather foi criado um bot de nome AVA (Assistente Virtual Autônoma), um *username* @AVA\_PPGER\_bot e gerado um API *Token*.

O API *Token* foi utilizado junto com a biblioteca *node-red-contrib-chatbot* do Node-RED para a criação e controle do *Chatbot* do sistema de monitoramento. Ao *Chatbot* foi atribuída a função de enviar alertas e relatórios a um grupo do Telegram, além de responder a comandos enviados pelos seus usuários. O *Chatbot* também é capaz de interagir através de conversas privadas iniciadas pelos usuários do sistema.

Para este projeto foi criado um grupo específico no Telegram, com o nome SSMGFV - PPGER (Sistema de Supervisão para Micro Geração Fotovoltaica - PPGER), onde foram adicionados o bot e alguns usuários.

Na Figura 49 é possível visualizar duas telas de um *smartphone* executando o aplicativo Telegram. Na imagem à esquerda pode-se ver o grupo SSMGFV - PPGER, criado no aplicativo Telegram e gerenciado pelo *Chatbot* desenvolvido. É possível visualizar também a interação de um integrante do grupo com o *Chatbot*. Nessa interação em particular, o usuário digita o comando "/help" e o *Chatbot* responde com uma mensagem contendo todos os comandos aceitos por ele, além de uma descrição sobre cada um. Na imagem à direita é visualizada uma conversa de um usuário no modo privado com o *Chatbot*. Nela, um comando foi enviado para o *bot* e o mesmo responde com as informações buscadas.

Figura 49 – Telas de um *smartphone* aberto no grupo criado e de uma conversa privada com o *ChatBot*.



Fonte: Autoria Própria

### 3.3.2 Detecção de falhas

A detecção de falhas foi dividida em duas partes, uma realizada por algoritmos implementados através de funções no Node-RED e outra, a partir de uma rede neural *perceptron* de múltiplas camadas (PMC). Esses algoritmos e a rede PMC são responsáveis por classificar e processar cinco categorias distintas de falhas ou condições de falhas.

A seguir serão detalhas as categorias de falhas e condições de funcionamento que podem afetar a eficiência do SSMGFV, os algoritmos desenvolvidos no Node-RED para detecção de falhas de conexões, a rede neural PMC e o script detector/identificador de

falhas relacionadas aos MFVs.

### 3.3.2.1 Falhas e condições de funcionamento que podem afetar a eficiência do SMGFV.

As falhas e condições de falhas monitoradas e classificadas pelos algoritmos e pela rede PMC foram divididas em cinco tipos de falhas básicas que, neste projeto, foram identificadas por códigos. A seguir são apresentados esses códigos e as falhas relacionadas a eles:

- F00 - MFVs desconectados.
- F01 - Inversor desconectado da rede elétrica.
- F02 - Placa de aquisição desconectada.
- F03 - Sombreamento e/ou células FVs danificadas.
- F04 - Sujidade.

No entanto, a falha F03 é subdividida em quatro níveis de abrangência, designados por F03-1, F03-2, F03-3 e F03-4, descritos a seguir:

- F03-1 - Sombreamento ou células com defeitos afetando até um terço de um MFV.
- F03-2 - Sombreamento ou células com defeitos afetando até dois terços de um MFV ou parcialmente dois MFVs. No caso de dois MFVs, a falha deve afetar até um terço de cada MFV.
- F03-3 - Sombreamento ou células com defeitos afetando completamente um MFV ou parcialmente três MFVs. No caso de três MFVs, a falha deve afetar até um terço de cada MFV.
- F03-4 - Sombreamento ou células FVs com defeitos em quantidades superiores aos níveis atendidos pela falha F03-3.

As falhas F00, F01 e F02 são detectadas pela aplicação, através da leitura direta dos dados enviados pelos sensores ou pela ausência de recebimento de informações advindas deles. Enquanto as falhas tipo F03 e F04 são detectadas pelo *script* detector/identificador de falhas que utiliza a PMC proposta como modelo preditivo, que através do processamento de dados disponibilizados dela aplicação de monitoramento consegue classificá-las.

A falha tipo F00 é caracterizada pela ocorrência de nível 0 de tensão na entrada CC do inversor, quando há irradiância solar suficiente para geração FV. Ela pode ser causada pelo rompimento dos cabos vindos dos MFVs, acionamento das proteções no QPS CC ou por seccionamento realizado pelo usuário.

A falha tipo F01 é caracterizada pela desconexão do inversor da rede elétrica. Ela pode ser causada pelo acionamento das proteções no QPS CA ou por seccionamento realizado pelo usuário. Vale salientar que o sistema de monitoramento não é capaz de detectar a falta de fornecimento de energia da concessionária, visto que o mesmo é alimentado por ela. Essa limitação poderia ser solucionada, por exemplo, através da implementação de uma fonte de alimentação auxiliar, que possibilitasse o funcionamento do sistema de monitoramento mesmo que ocorresse falhas no fornecimento de energia por parte da concessionária. Apesar de não possuir essa implementação, após a queda e retorno da energia, o sistema de monitoramento envia um aviso de que foi reiniciado.

Falhas do tipo F02 dizem respeito à falta de comunicação entre as placas de aquisição e o sistema de monitoramento. Esses tipos de falhas podem ser causadas por desligamento, mal funcionamento das placas de aquisição ou falhas de conexão entre elas e o *Broker* MQTT.

As falhas do tipo F03 são provocadas por sombreamento e/ou danos nos MFVs. Nas Figuras 50 e 51 são demonstrados como foram simuladas essas falhas. Na Figura 50 é apresentada uma falha F03-2, onde foi realizado o sombreamento de algumas células de um dos MFVs do SMGFV. Nesse caso, dois terços da capacidade de geração de potência do módulo FV foi comprometida. Na Figura 51 é apresentada uma falha F03-4 causada pelo sombreamento de vários MFVs simultaneamente. Esse tipo de falha é gerada naturalmente todos os dias no SFV adotado neste projeto, pois por volta das 15:30 horas, os MFVs começam a sombrear uns sobre os outros.

A falha tipo F04 foi simulada através do depósito de fécula de mandioca sobre os MFVs do SMGFV. O ideal seria acúmulo natural de poeira e sujeira, no entanto durante o período de coleta não se verificou essa situação. Na Figura 52 é apresentado o estado dos MFVs durante a coleta dos dados para essa condição de falha.

### 3.3.2.2 Algoritmos

Foram desenvolvidos três algoritmos para a detecção de falhas de funcionamento do SMGFV e do próprio sistema de monitoramento. As falhas detectadas são referentes à desconexão dos MFVs, do inversor da rede elétrica e das placas de coleta de dados.

Na Figura 53 é apresentado o fluxograma do algoritmo para detecção de falhas tipo F00.

Esse algoritmo apresentado na Figura 53 comporta-se da seguinte forma:

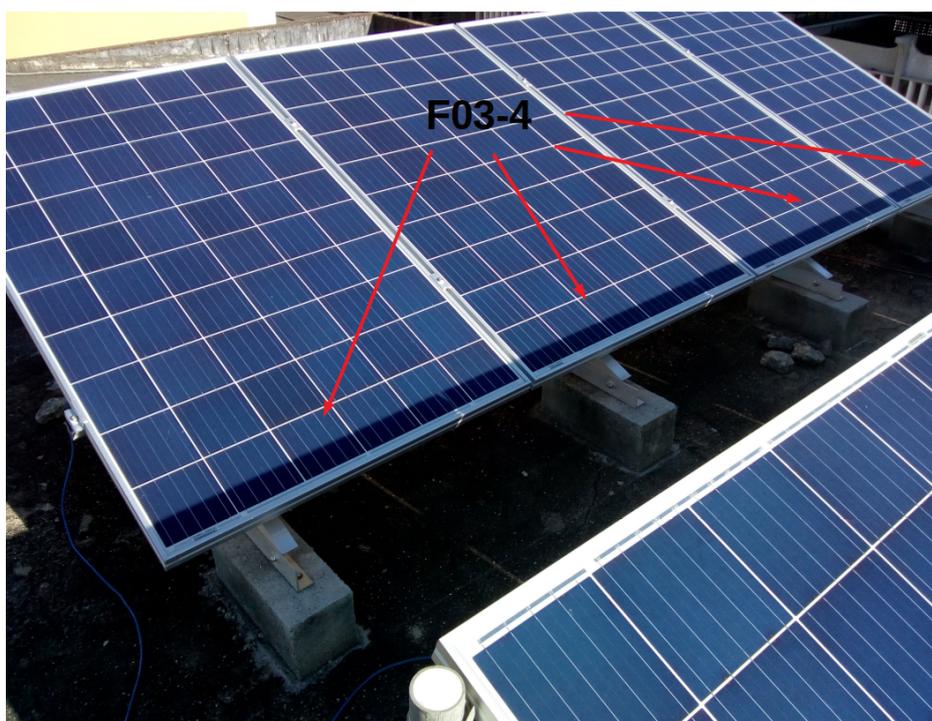
- Ao iniciar, verifica se a tensão contínua que chega na entrada CC do inversor do SMGFV é igual a zero. Em caso negativo, há a sinalização que os MFVs estão conectados e o algoritmo reinicia a verificação.

Figura 50 – Sombreamento de algumas células de um MFV do SMGFV para gerar um falha tipo F03-2.



Fonte: Autorial própria

Figura 51 – Falha F03-4 causada pelo sombreamento de vários MFVs simultaneamente.



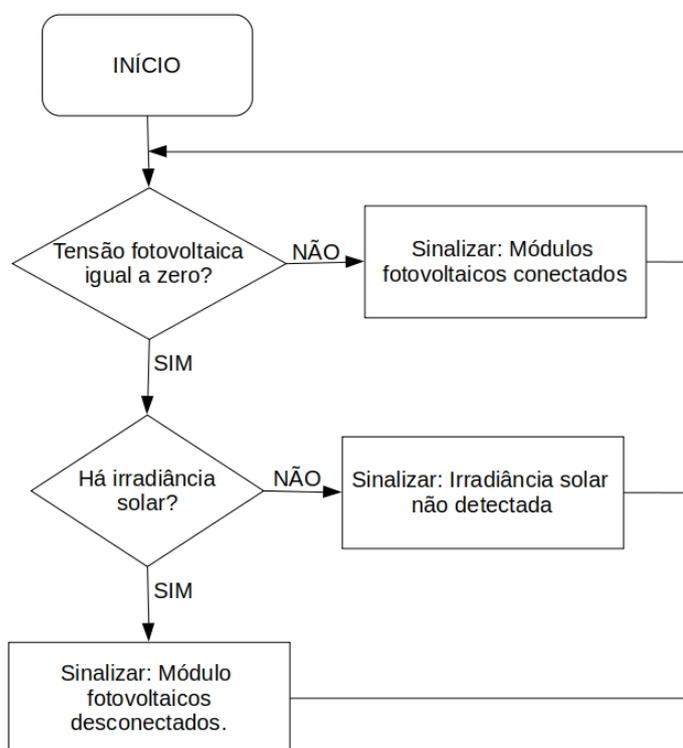
Fonte: Autorial própria

Figura 52 – Falha F04 gerada artificialmente.



Fonte: Autorial própria

Figura 53 – Fluxograma - Detecção de falhas de desconexão dos MFVs.

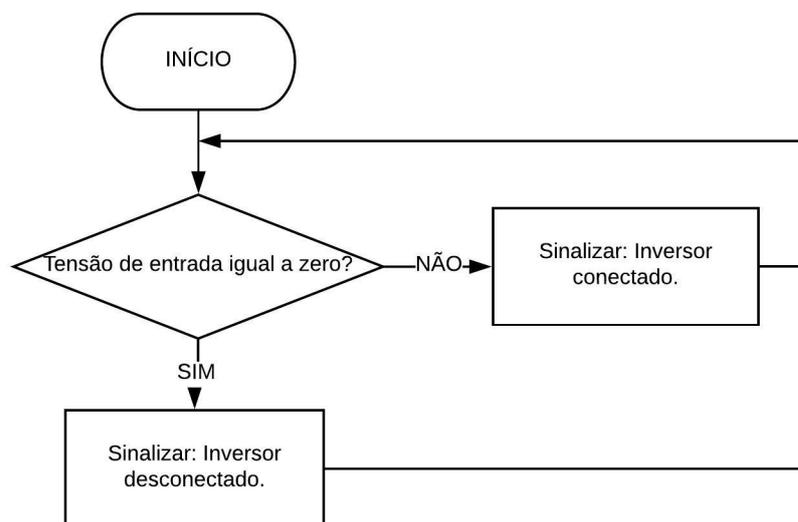


Fonte: Autorial Própria

- Caso a tensão seja igual a zero, o algoritmo verifica se há irradiância solar, através da análise dos valores coletados pelo piranômetro. Caso não haja irradiância solar, o algoritmo sinaliza como "Irradiância solar não detectada" e é reiniciada a verificação.
- Caso ainda haja irradiância solar, o algoritmo sinaliza como "MFVs desconectados" e é reiniciada a verificação.

Na Figura 54 é apresentado o fluxograma do algoritmo para detecção de falhas tipo F01. Esse algoritmo é responsável pelo monitoramento de um único inversor, no caso do monitoramento de mais inversores, deve-se adicionar iguais quantidades das funções ao Node-RED.

Figura 54 – Fluxograma - Detecção de falhas de desconexão do inversor da rede elétrica.



Fonte: Autoria Própria

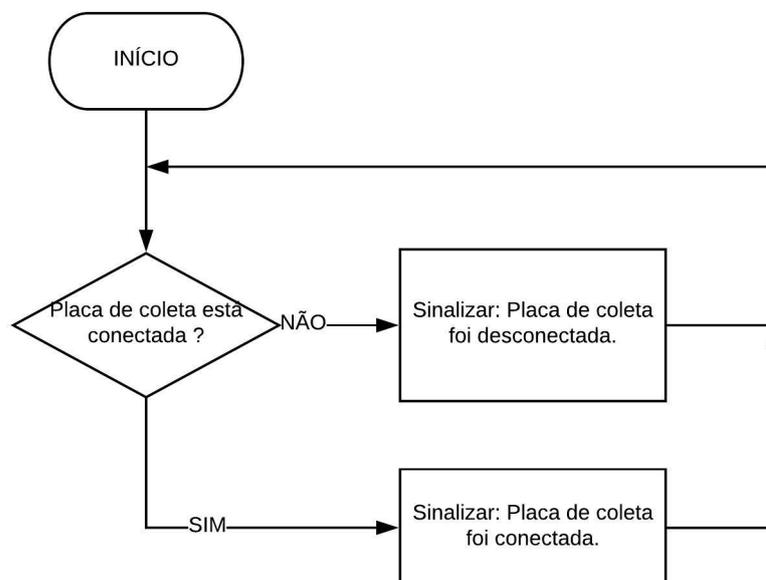
O algoritmo apresentado na Figura 54 se comporta da seguinte forma:

- Ao iniciar, o mesmo verifica se a tensão CA que alimenta o inversor é igual a zero. Em caso negativo, sinaliza como "inversor conectado" e é reiniciado.
- Caso a tensão seja igual a zero, ocorre a sinalização "inversor desconectado" e o algoritmo é reiniciado.

Na Figura 55 é apresentado o fluxograma do algoritmo responsável pela detecção de falhas do tipo F02. Este, também é responsável pelo monitoramento de uma única placa, no caso do uso de mais placas iguais, deve-se adicionar as mesmas quantidades das funções ao Node-RED.

O algoritmo apresentado na Figura 55 se comporta da seguinte forma:

Figura 55 – Fluxograma - Detecção de falhas de desconexão das placas de coleta de dados.



Fonte: Autoria Própria

- Ao iniciar, o mesmo verifica se a placa analisada está publicando no *Broker* MQTT. Para testar esse condição, o algoritmo verifica se durante os últimos trinta segundos ocorreu publicação no *Broker* MQTT por parte da placa. Em caso negativo, sinaliza como "placa de coleta desconectada" e é reiniciado o processo de verificação.
- Caso a placa de coleta de dados esteja publicando no MQTT *Broker*, é sinalizado que a placa de coleta está conectada e o algoritmo é reiniciado.

Esses três algoritmos estão embutidos no *script* do sistema de monitoramento desenvolvido através do Node-RED. As sinalizações e notificações são visualizadas através das interfaces locais e remotas.

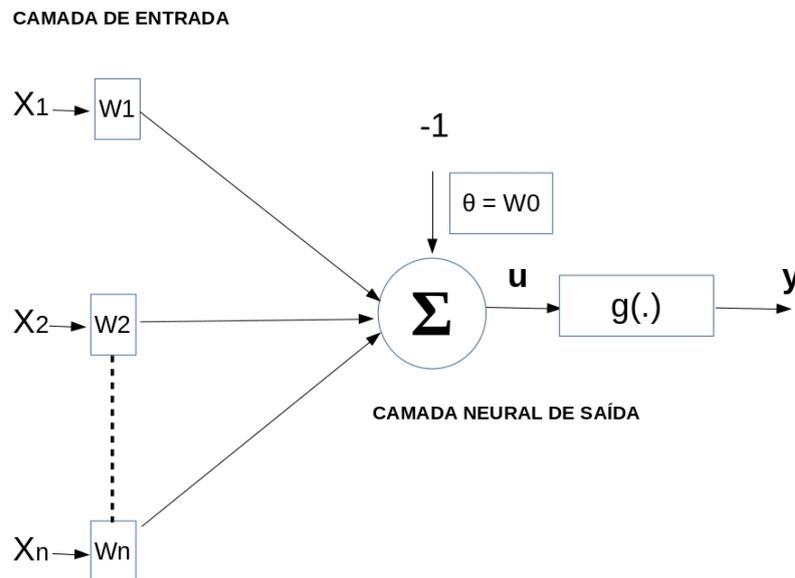
### 3.3.2.3 Rede neural

Para a identificação da ocorrência de sombreamento, danos e sujidade nos MFVs do sistema de geração, foram testadas uma rede *Perceptron* e a rede *Perceptron* multicamadas (PMC).

A rede *Perceptron* foi escolhida inicialmente por se tratar da rede neural artificial de configuração mais simples e com potencial de classificar linearmente os dados coletados. Segundo [Silva, Spatti e Flauzino \(2010\)](#) esse tipo de rede é composta de apenas uma camada de entrada, responsável por receber os parâmetros dos dados que serão classificados, e uma única camada de neurônios que, no caso, é a própria camada de saída. Na Figura 56 é ilustrada uma rede *Perceptron* formada por uma camada de entrada e um único neurônio

na sua camada de saída. Na camada de saída há a função de ativação " $g(\cdot)$ " que pode ser uma função degrau ou degrau bipolar.

Figura 56 – Ilustração da rede *Perceptron*.



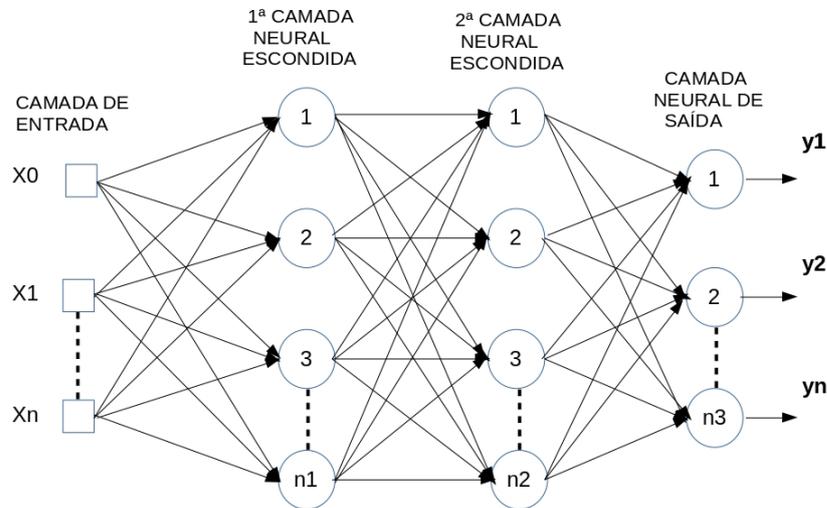
Fonte: Autoria Própria

Neste trabalho foram testadas duas configurações de redes *Perceptron*, sendo uma com apenas um neurônio de saída e outra com seis neurônios de saídas. A rede com apenas um neurônio foi utilizada como classificador binário, onde o dado apresentado era classificado entre dado normal ou dado de falha. Enquanto a rede de seis neurônios ficou responsável por classificar o dado entre seis classes distintas, que foram: normal; quatro níveis de falhas do tipo F03; e falha do tipo F04.

A escolha pela rede PMC levou em consideração a sua alta aplicabilidade na resolução dos mais variados problemas de classificação. [Silva, Spatti e Flauzino \(2010\)](#) afirmam que as rede PMC são umas das mais versáteis quanto as aplicabilidades, podendo ser utilizada para o reconhecimento de padrões e classificação.

A rede PMC, diferentemente da rede *Perceptron*, possui pelo menos uma camada intermediária de neurônios entre a camada de entrada e a camada de saída. Além disso, a resposta das saídas desse tipo de rede é dependente da interação entre todos os neurônios que a compõem. Na Figura 57 é ilustrada uma rede PMC formada por uma camada de entrada, duas camadas de neurônios intermediárias e um camada de saída. Como função de ativação nos neurônios dessa rede podem ser utilizadas funções parcialmente diferenciáveis e totalmente diferenciáveis.

Figura 57 – Ilustração de uma rede PMC com duas camadas intermediárias.



Fonte: Autoria Própria

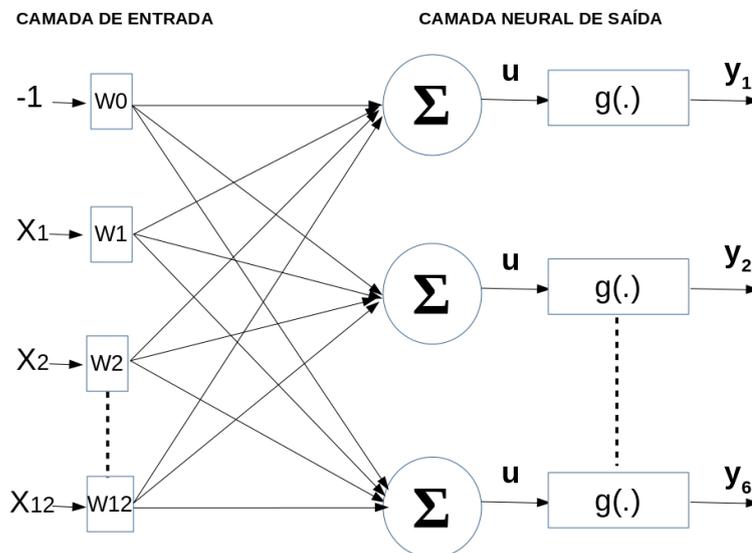
Tanto a rede *Perceptron* como a rede PMC deste projeto foram construídas e treinadas para aceitar como atributos de entrada os dados recebidos pelas placas de coleta, que são: irradiância solar, corrente e tensão contínua gerada pelo *string* FV, temperaturas individuais das 8 caixas de diodos de *bypass* dos MFV do SMGFV e a temperatura média dos MFVs. Através desses dados, as redes mencionadas acima, quando configuradas para tal, são capazes de classificar os dados recebidos em seis classes distintas: normais, quatro níveis diferentes de sombreamento e/ou danos em células dos MFVs e MFVs sujos.

Na Figura 58 é ilustrada a rede *Perceptron* utilizada neste trabalho quando configurada para classificar seis classes distintas. A mesma é formada por uma camada de entrada e uma camada de saída. A camada de entrada recebe os doze atributos anteriormente citados e a camada de saída é composta por 6 neurônios. Como função de ativação " $g(\cdot)$ " foi utilizada uma função degrau bipolar.

Na Figura 59 é apresentada a topologia da PMC proposta, formada por uma camada de entrada, uma camada escondida e uma camada de saída. A camada de entrada recebe os doze atributos anteriormente citados, a camada escondida é composta por trinta neurônios e a camadas de saída por 6 neurônios. Como função de ativação dos neurônios foi utilizada a função logística.

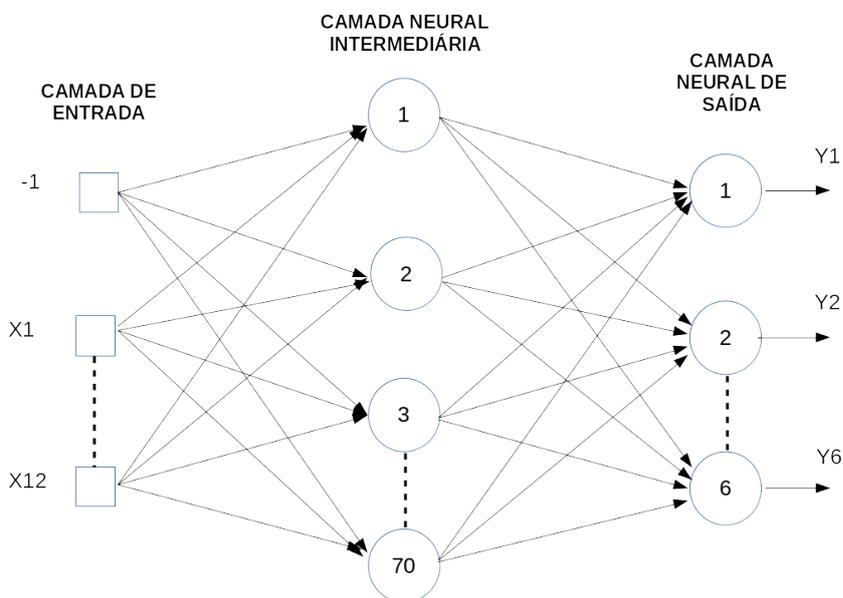
Para o desenvolvimento, treinamento e teste das redes neurais apresentadas acima foi utilizada a plataforma de ciência de dados *Python* Anaconda. A escolha por essa

Figura 58 – Ilustração da rede *Perceptron* utilizada neste trabalho quando configurada para classificar seis classes.



Fonte: Autoria Própria

Figura 59 – Topologia da rede neural PMC utilizada neste projeto.



Fonte: Autoria Própria

plataforma levou em consideração o fato da mesma possuir uma série de ferramentas para ciência de dados, análise preditiva, computação científica e *machine learning*.

Através da plataforma Anaconda foram desenvolvidos dois *scripts* em linguagem *Python*, um para a rede *Perceptron* e outro para a PMC. Esses *scripts* são responsáveis

por treinar, testar e salvar a melhor configuração de rede no que se refere à classificação dos dados. O código fonte dos mesmos pode ser consultado no Apêndice F.

As taxas de acertos, a escolha da quantidade de neurônios e a análise do comportamento das redes propostas são apresentadas no capítulo seguinte.

#### 3.3.2.4 *Script* detector/identificador de falhas relacionadas aos MFVs

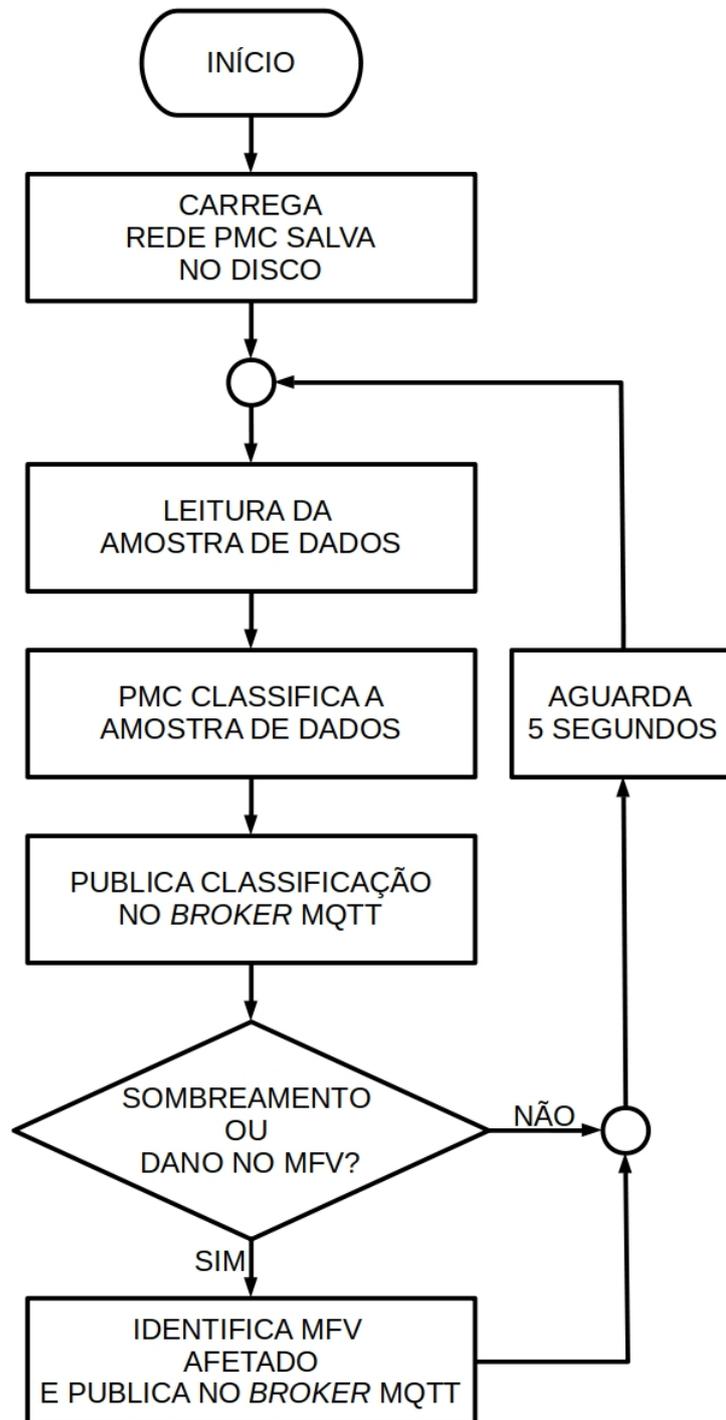
Foi desenvolvido um *script* para utilizar o melhor modelo de rede PMC obtido nesse projeto para classificar os dados coletados pelo sistema de monitoramento e identificar eventualmente qual o MFV está apresentando sombreamento ou danos em suas células. Esse *script* foi projetado para ser executado em conjunto com a aplicação de monitoramento desenvolvida no Node-RED para classificar os dados em tempo real. O código fonte do mesmo pode ser consultado no Apêndice F.

Na Figura 60 é apresentado o fluxograma simbolizando o funcionamento do *script* desse detector de falhas.

O *script* representado na Figura 60 se comporta da seguinte forma:

- Ao iniciar o *script* busca e carrega o modelo da rede PMC salva em disco e que será utilizada como classificador;
- Em seguida realiza a leitura da amostra de dados, a classifica e publica o resultado da classificação no *Broker* MQTT que está sendo executado no RPi;
- Em seguida ele testa se o dado foi classificado como sombreamento ou dano em módulo FV. Caso negativo ele reinicia o processo de leitura da amostra de dados, classificação e publicação de resultado;
- Caso seja identificado sombreamento ou dano em algum módulo FV é realizado a identificação de qual foi o módulo afetado e publicado a informação no MQTT *Broker*. Após isso, ele reinicia o processo de leitura da amostra de dados, classificação e publicação de resultado.
- Após a execução dos passos anteriores, o *script* aguarda 5 segundos e reinicia o processo de leitura da amostra e sua classificação.

Para evitar que ruídos registrados durante a coleta de dados prejudicassem a confiabilidade do sistema, foi implementada uma função no Node-RED que só permite a sinalização para o usuário de eventuais falhas detectadas e classificadas pelo *script*, comentado anteriormente, quando a sua ocorrência persiste por mais de um minuto. Vale salientar que a execução deste *script* é iniciada e finalizada automaticamente pelo sistema de monitoramento.

Figura 60 – Fluxograma do funcionamento do *script* do detector de falhas.

Fonte: Autoria Própria

## 4 Resultados

Neste capítulo serão descritos os resultados obtidos através do sistema de monitoramento e das técnicas utilizadas para detecção e identificação de falhas.

### 4.1 Monitoramento

Nessa seção são apresentados os detalhes de como o sistema de monitoramento armazena e processa os dados coletados pelos sensores, bem como, faz-se uma explanação de como são realizadas as interações e notificações para com os usuários.

#### 4.1.1 Armazenamento e processamento dos dados

As informações adquiridas pelas placas de coleta de dados são armazenadas localmente no RPi e, ao final do dia, são publicadas no grupo "SMMGFV - PPGER" do serviço de mensagem *Telegram*.

Para facilitar a leitura e manipulação dos dados, os mesmos são salvos localmente em arquivo de texto simples, no diretório `/home/pi/Documents/PPGER/SMMGFV/hoje/`, com o nome `dados.txt`. Nesse arquivo, são adicionados com uma frequência de uma linha de texto por segundo, a data, o horário da gravação e os dados coletados. Cada vez que o sistema de monitoramento tenta alterar o arquivo `dados.txt`, verifica antes se o mesmo está contido no diretório. Em caso negativo, o arquivo é criado pelo sistema de monitoramento.

Na Figura 61, é apresentada a visualização, através do programa *LibreOffice calc*, do arquivo `dados.txt`, que contém dados coletados no dia 13 de março de 2018, em condição de funcionamento normal do SMGFV monitorado. O arquivo é composto por quinze colunas, sendo que em cada uma são armazenados dados distintos processados pelo sistema de monitoramento. Observando as colunas da esquerda para direita é possível visualizar os seguintes dados: Data e hora, referente ao momento da coleta de cada dado, Irr - irradiância solar, Icc - corrente contínua, Vcc - tensão contínua, Pcc - potência CC, Ica - corrente alternada, Vca - tensão alternada, Pca - potência CA, TPM - temperatura média do conjunto MFVs, medida no ponto central de cada módulo, como visto anteriormente na Figura 42, e TD01 a TD08 - temperaturas individuais das caixas de diodos de *bypass* dos MFVs.

O período diário de gravação de dados no arquivo foi limitado pelo sistema de monitoramento de 05:00 às 18:59 horas. Após esse horário, o arquivo é publicado pelo sistema de monitoramento através do *bot* AVA no grupo SMMGFV - PPGER do *Telegram*, onde é feito

Figura 61 – Visualização do arquivo dados.txt, através do programa *LibreOffice Calc*.

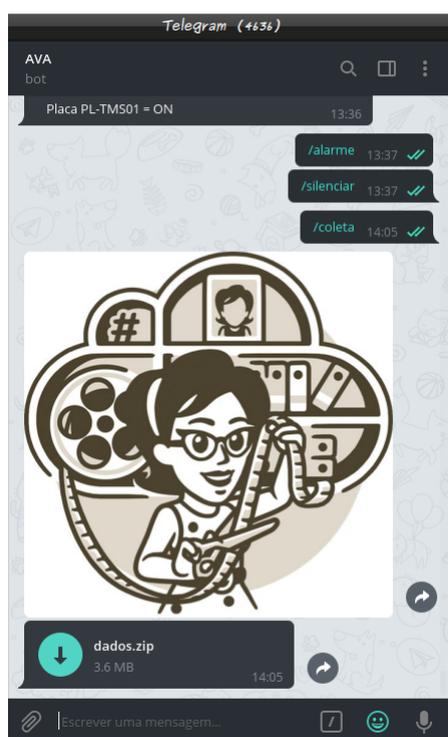
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	<b>Data – Hora</b>	<b>lrr</b>	<b>lcc</b>	<b>Vcc</b>	<b>lca</b>	<b>Vca</b>	<b>TPM</b>	<b>TD01</b>	<b>TD02</b>	<b>TD03</b>	<b>TD04</b>	<b>TD05</b>	<b>TD06</b>	<b>TD07</b>	<b>TD08</b>
2	2018-03-13T05:01:11.311Z	0	0.2	0	0.1	220	20	20	20	20	21	20	21	21	21
3	2018-03-13T05:01:12.324Z	0	0.2	0	0.1	220	20	20	20	20	21	20	21	21	21
4	2018-03-13T05:01:13.337Z	0	0.2	0	0.1	220	20	20	20	20	21	20	21	21	21
5	2018-03-13T05:01:14.351Z	0	0.2	0	0.1	221	20	20	20	20	21	21	21	21	21
6	2018-03-13T05:01:15.368Z	0	0.2	0	0.1	221	20	20	20	20	21	21	21	21	21
7	2018-03-13T05:01:16.382Z	0	0.2	0	0.1	221	20	20	20	20	21	21	21	21	21
8	2018-03-13T05:01:17.395Z	0	0.2	0	0.1	221	20	20	20	20	21	21	21	21	21
9	2018-03-13T05:01:18.411Z	0	0.2	0	0.1	221	20	20	20	20	21	20	21	21	21
10	2018-03-13T05:01:19.425Z	1	0.2	0	0.1	220	20	20	20	20	21	20	21	21	21
11	2018-03-13T05:01:20.440Z	1	0.2	0	0.1	220	20	20	20	20	21	20	21	21	21
12	2018-03-13T05:01:21.456Z	1	0.2	0	0.1	220	20	20	20	20	21	20	21	21	21

Fonte: Autoria própria

o seu armazenamento, caso o sistema esteja conectado à internet. Em seguida, o arquivo é compactado e movido para o diretório `/home/pi/Documents/PPGER/SMMGFV/backups/`.

O acesso local a esse arquivo é restrito ao administrador do sistema, através de *login* no sistema operacional do RPi. O acesso remoto aos últimos dados coletados é feito através da solicitação ao *bot* AVA, por meio do comando “/coleta”, a qualquer momento que o usuário deseje. Na Figura 62 é exemplificada a solicitação ao *bot* AVA, dos dados coletados desde o último *backup*. O usuário envia o comando “/coleta” e é respondido com uma mensagem que contém o arquivo dados.zip, com uma cópia do arquivo "dados.txt", armazenado no diretório `/home/pi/Documents/PPGER/SMMGFV/hoje/`.

Figura 62 – Solicitação de um usuário ao bot AVA.



Fonte: Autoria própria

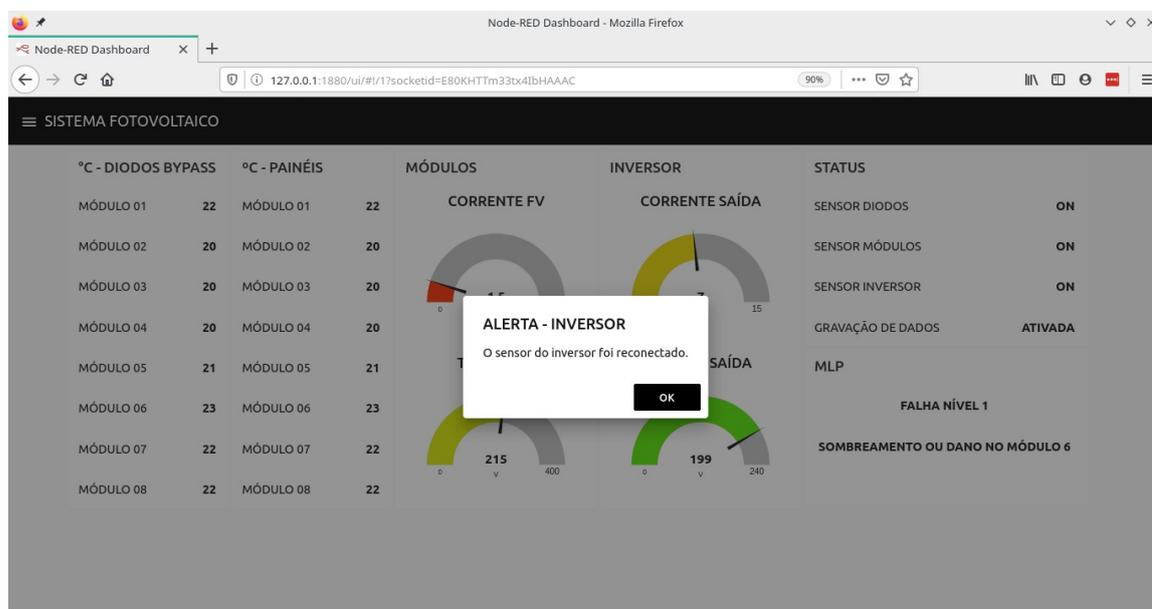
## 4.1.2 Notificações

A notificação enviada aos usuários, sobre o funcionamento do sistema de monitoramento e sobre a ocorrência de possíveis falhas, é realizada tanto pela interface gráfica local (visível através de janela *pop-up*) e mensagens enviadas pelo *bot* AVA, quanto por sinal sonoro, realizado através do acionamento do *buzzer* conectado ao RPi. O *buzzer*, emite um som intermitente caso ocorra alguma falha ou um som contínuo, por 10 segundos, quando o sistema está sendo reiniciado. Em caso de acionamento do *buzzer*, o mesmo pode ser silenciado através da correção da falha que ativou o seu funcionamento ou pelo próprio usuário, por meio da aplicação. As opções encontradas na interface para esse fim são o botão SILENCIAR, disponível na tela HOME ou ainda através o envio do comando "/silenciar" para o *bot* AVA.

Notificações e sinalizações de falhas realizadas através da interface gráfica local são visíveis através de janelas *pop-up*, que somente desaparecem após o usuário confirmar leitura, pressionando a opção "ok", disponível na notificação. As notificações realizadas através do *bot* AVA, por sua vez, são visíveis remotamente através do aplicativo *Telegram*.

Nas Figura 63 é apresentada uma imagem da tela de um microcomputador aberto na aplicação de monitoramento. No centro da tela é mostrada uma janela *pop-up* com uma mensagem de notificação.

Figura 63 – Notificação de alerta visível através da interface local.



Fonte: Autoria própria

Na Figura 64 são apresentadas imagens da tela de um *smartphone* aberto no aplicativo *Telegram*, onde é possível visualizar mensagens de alertas enviadas pelo *bot* AVA. Na figura à esquerda são visualizadas notificações de alertas e falhas e à direita, uma notificação sobre o reinício e funcionamento do sistema.

Figura 64 – Notificações enviadas pelo bot AVA



Fonte: Autoria própria

## 4.2 Detecção de falhas

A detecção de falhas no funcionamento do SMGFV e no próprio sistema de monitoramento é realizada através da execução da aplicação desenvolvida no *node-RED*, detalhada no Apêndice D.

Para a detecção de falhas no sistema de monitoramento e falhas de desconexões dos componentes do SMGFV a aplicação desenvolvida no *node-RED* executa *scripts* implementados diretamente no seu código fonte e que já foram detalhados no capítulo anterior. Já para a detecção de falhas de sujidade, sombreamentos e/ou danos no MFVs, além de identificar qual o MFV afetado, a aplicação executa um *script* desenvolvido na linguagem *Python*. Esse *script* utiliza um modelo previamente treinado e testado de uma rede *Perceptron* multicamadas (PMC) para a detecção da falha.

A seguir são detalhados os dados coletados e utilizados no desenvolvimento da rede PMC. São apresentadas ainda, as alternativas de redes neurais que foram testadas e os resultados obtidos desde o desenvolvimento até a escolha da rede PMC.

### 4.2.1 Análise do dados utilizados

Para o desenvolvimento da rede PMC foram utilizados os dados coletados nos seguintes dias e horários:

- Normal - 18/07/2018 das 05:46h às 15:19h
- F03-1 - 20/07/2018 das 05:50h às 15:19h
- F03-2 - 25/07/2018 das 05:45h às 15:19h
- F03-3 - 31/07/2018 das 05:50h às 15:19h
- F03-4 - 15/07/2018 a 18/07/2018 das 15:25h às 17:24h
- F04 - 19/07/2018 das 05:55h às 15:19h

Para uma melhor análise das condições de irradiância solar, registradas nos dias e horários citados acima, foram confeccionados gráficos contendo os dados coletados e que podem ser consultados no Apêndice E.

O horário de início da coleta de dados normais e de falhas F03-1, F03-2, F03-3 e F04 foi escolhido com base no início de funcionamento do inversor do sistema, definido automaticamente pelo seu algoritmo interno. O horário de término levou em consideração o momento diário em que os MFVs começam a ser sombreados pela própria estrutura do SMGFV. Esse sombreamento, por sua vez, gera a falha F03-4, que tem seus dados coletados até o desligamento automático do inversor. Esse dados foram rotulados e agrupados em um único arquivo, no formato ".csv", para uma melhor análise e processamento de seu conteúdo, através dos *scripts* desenvolvidos neste projeto para obtenção do melhor modelo preditivo. O arquivo citado acima e o *script* utilizados para sua análise podem ser consultados no Apêndice F.

Através da execução do *script* citado no parágrafo anterior, constata-se que o arquivo analisado é formado por 192094 amostras de dados, distribuídas em linhas no arquivo ".csv". Sendo doze atributos de entrada distribuídos em doze colunas e os rótulos de cada amostra encontram-se localizados na última coluna.

O *script* também possibilita a visualização das vinte primeiras linhas do arquivo. Na Tabela 3 é possível visualizar os valores dos dez primeiros parâmetros das cinco primeiras amostras de dados contidas no arquivo já citado. Na tabela, são visíveis ainda os rótulos dos dez primeiros atributos, que são: Irr - irradiância solar, Icc - corrente contínua, Vcc - tensão contínua, TPM - temperatura média dos MFVs, TD01 a TD06 - temperatura da caixa de diodo do MFVs 01 a 06.

Além das informações anteriores, através do *script* é possível quantificar as amostras por classes de dados, o que pode ser visto na Tabela 4, bem como o resumo dos campos numéricos dos dados que serão utilizados pelas redes, apresentado na Tabela 5. Nesta, é apresentado um resumo dos campos numéricos dos dados de irradiância solar e corrente contínua contidas no arquivo.

Tabela 3 – Visualização parcial dos dados contidos no arquivo utilizado no desenvolvimento da rede PMC

Irr	Icc	Vcc	TPM	TD01	TD02	TD03	TD04	TD05	TD06
30.738963	0.0	215	19	19	19	19	19	19	19
30.738963	0.0	215	19	19	19	19	19	19	19
30.738963	0.0	206	19	19	19	18	19	19	19
30.738963	0.0	197	19	19	19	18	19	19	19
30.738963	0.0	196	19	19	19	18	19	19	19

Tabela 4 – Quantidade de amostras por classe.

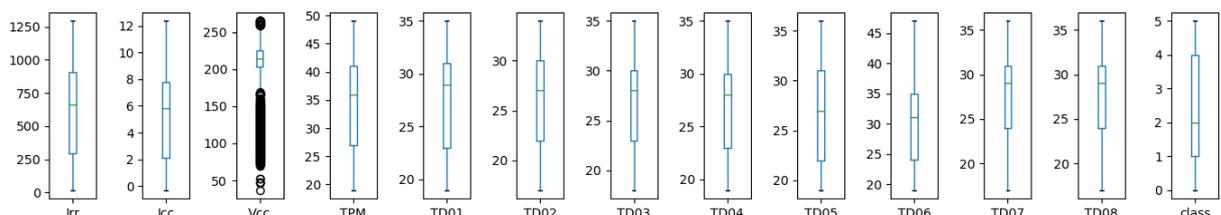
CLASSE	QUANTIDADE
0 (NORMAL)	33943
1 (F03-1)	34571
2 (F03-2)	34739
3 (F03-3)	34346
4 (F03-4)	19234
5 (F04)	35261

Tabela 5 – Resumo dos campos numéricos dos dados de irradiância solar e corrente contínua.

	Irr	Icc
<b>Quant. Amostras</b>	192094	192094
<b>Valor médio</b>	599,4	5,1
<b>Valor mínimo</b>	18	-0,3
<b>25% do valor</b>	294,1	2,1
<b>50% do valor</b>	661	5,8
<b>75% do valor</b>	905,4	7,8
<b>Valor máximo</b>	1293,8	12,3

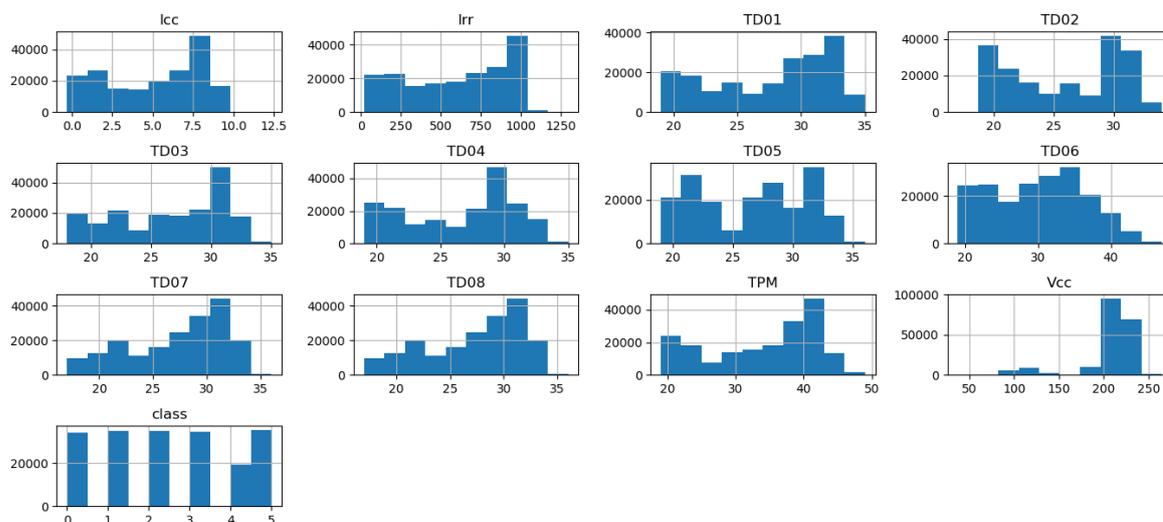
O *script* permite ainda fazer uma análise da faixa de alcance dos valores de cada atributo dos dados. Na Figura 65 é possível visualizar essas informações através de gráficos *box plots*, enquanto na Figura 66 é possível visualizar a mesma variação através de histogramas.

Figura 65 – Gráficos *box plots* da faixa de alcance dos valores de cada parâmetro.



Fonte: Autoria própria

Figura 66 – Histogramas contendo a faixa de alcance dos valores de cada parâmetro.



Fonte: Autoria própria

## 4.2.2 Rede neural

Antes do desenvolvimento da rede PMC, os dados foram aplicados em uma rede *Perceptron*, que é a forma mais simples de configuração de rede neural artificial (RNA), para verificação da viabilidade de se utilizar um classificador linear. Entretanto, após análise dos resultados obtidos, optou-se pelo desenvolvimento da rede PMC. A seguir são apresentados os resultados obtidos pela duas redes.

### 4.2.2.1 Rede *Perceptron*

Inicialmente os dados apresentados na subsecção anterior foram usados para treinamento e teste de duas configurações de redes *Perceptron*. A primeira configuração continha apenas um neurônio de saída, para cenários de classificação binária, e a segunda continha seis neurônios de saída. Com as duas configurações foram testados sete cenários de classificação. Na Tabela 6 são apresentadas as taxas de acertos desses sete cenários.

Tabela 6 – Taxas de acerto das redes *Perceptron*

CLASSES	TAXAS
NORMAL X TODAS AS FALHAS	81,83 %
NORMAL X F03-1	92,53 %
NORMAL X F03-2	93,34 %
NORMAL X F03-3	98,48 %
NORMAL X F03-4	90,00 %
NORMAL X F04	86,48 %
SEIS CLASSES	61,02 %

Dos sete cenários de teste apresentados na Tabela 6, quatro deles serão melhor

detalhados a seguir, em razão da possibilidade de aplicabilidade como detector de falhas. São eles:

- Normal x Falhas - Capacidade de classificação em situação de funcionamento normal e situação de falha.
- Normal x F03-1 - Possibilidade de identificação inicial de danos e/ou sombreamentos em MFVs.
- Normal x F04 - Capacidade de detectar quando os MFVs estão sujeitos.
- Seis classes - Possibilidade de classificar o dados entre seis categorias diferentes.

Para o primeiro cenário de classificação, em que há dados de funcionamento normal e falhas, apenas um neurônio de saída foi utilizado e a rede obteve uma taxa de acerto de aproximadamente 82%. Na Tabela 7 é apresentada a matriz de confusão para esse cenário.

Tabela 7 – Matriz de confusão da classificação em dados normais e falhas, através da rede *Perceptron*.

RÓTULO\PREDITO	NORMAL	FALHAS
NORMAL	94%	6%
FALHAS	21%	79%

Analisando a tabela acima, percebe-se que cerca de um quinto dos dados de falhas foram classificados como dados de funcionamento normal. Esse comportamento pode mascarar um funcionamento ineficiente ou potencialmente catastrófico do SMGFV como normal. Assim, conclui-se que a rede não é indicada para classificação desse cenário.

Para o cenário de detecção prematura de danos ou sombreamento nos MFVs, a rede obteve uma taxa de acertos de aproximadamente 92%. Na Tabela 8 é apresentada a matriz de confusão para esse cenário de teste.

Tabela 8 – Matriz de confusão da classificação em dados normais e falhas F03-1, através de rede *Perceptron*.

RÓTULO\PREDITO	NORMAL	F03-1
NORMAL	99%	1%
F03-1	14%	86%

Apesar da tabela acima demonstrar que 14% dos dados referentes às falhas F03-1 foram classificados como de funcionamento normal, a proposta se mostra promissora, pois busca detectar falhas em estágio inicial e que, em tese, não causariam grandes prejuízos ao sistema.

Na configuração para detecção de MFVs sujos, a rede obteve taxa de acerto de aproximadamente 86%. Na Tabela 9 é apresentada a matriz de confusão para esse cenário de teste.

Tabela 9 – Matriz de confusão da classificação em dados normais e falhas do tipo F04, através de rede *Perceptron*.

RÓTULO\PREDITO	NORMAL	F04
NORMAL	77%	23%
F04	4%	96%

Ao analisar a tabela acima, constata-se que essa configuração não é interessante, pois 23% dos dados de funcionamento normal foram classificados como MFVs sujos. Essa taxa de falso positivo para sujidade pode passar a sensação de sistema pouco confiável para o usuário de um futuro sistema de detecção implementado com essa rede, induzindo limpezas desnecessárias dos MFVs.

Para a classificação dos dados entre seis classes diferentes foram utilizados seis neurônios de saída. Nessa configuração a rede obteve taxa de acertos de aproximadamente 61%. Na Tabela 10 é apresentada a matriz de confusão para esse cenário de teste.

Tabela 10 – Matriz de confusão da classificação em seis classes distintas através da rede *Perceptron* com seis neurônios de saída.

RÓTULO\PREDITO	NORMAL	F03-1	F03-2	F03-3	F03-4	F04
NORMAL	68%	8%	0%	0%	0%	24%
F03-1	20%	45%	0%	2%	5%	28%
F03-2	0%	6%	2%	52%	25%	15%
F03-3	0%	3%	0%	87%	2%	8%
F03-4	0%	2%	0%	2%	85%	11%
F04	4%	6%	0%	1%	0%	89%

A baixa taxa de acerto, quando comparada às redes anteriores, aliada aos resultados apresentados na matriz de confusão, evidenciam que a rede proposta acima não é uma solução confiável. Um exemplo é a taxa de apenas 2% de acertos para a classe F03- 2.

Tomando por base as informações sobre as taxas de acertos das redes *Perceptron* apresentadas nessa subsecção, é possível afirmar que a rede que melhor poderia atender seria a que classifica dados normais e falhas F03-1. No entanto, como a proposta desse projeto é construir um sistema capaz de diferenciar dados de cinco tipos de falhas e funcionamento normal, a utilização da rede *Perceptron* não se mostrou viável.

Os mesmos dados foram testados em uma rede PMC, cujos resultados obtidos são apresentados na subsecção a seguir. O *script* utilizado para treinamento, teste e visualização das taxas de acertos podem ser consultados no Apêndice F.

## 4.2.2.2 Rede PMC

Em razão das baixas taxas de acertos obtidas através da utilização das redes *Perceptron*, buscou-se a utilização de uma RNA mais robusta e capaz de classificar os dados com uma maior confiabilidade. A RNA escolhida foi a rede PMC, que após ajustes, treinamento e teste se mostrou viável para utilização neste projeto.

O desenvolvimento da rede PMC tomou por base os mesmos dados utilizados para o desenvolvimento das redes *Perceptron* descritas na subsecção anterior e que foram divididos e rotulados em seis classes diferentes, como apresentado anteriormente na Tabela 5, com 80% do conjunto de dados sendo utilizado para o treinamento e 20% para a validação.

Inicialmente foram realizados treinamentos e testes com dezesseis modelos de redes PMC distintas, compostas cada uma por uma camada de entrada, uma camada intermediária e uma camada de saída. Nessa etapa, as camadas de entrada e saída foram mantidas fixas, com doze parâmetros de entradas e seis neurônios de saída, respectivamente, e a quantidade de neurônios da camada intermediária variou entre 16 valores. Como função de ativação dos neurônios foi utilizada a função logística.

Durante o processo de treinamento, as redes PMC foram configuradas com uma taxa de aprendizado de 0,0001, uma tolerância de 0,000001, uma quantidade máxima de interação de 10000 e um limite de não mudança no aprendizado de 200 interações.

Na Tabela 11 são apresentadas as taxas de acertos obtidas pelas redes PMC, em que foram experimentadas quantidades diferentes de neurônios na camada intermediária.

Tabela 11 – Taxas de acertos obtidas pelas redes PMC, em que foram experimentadas quantidades diferentes de neurônios na camada intermediária.

QUANTIDADE DE NEURÔNIOS	TAXA
1	69,38%
2	89,84%
3	93,21%
4	94,77%
5	95,85%
6	96,70%
7	97,03%
8	97,49%
9	97,75%
10	97,92%
20	98,94%
30	99,15%
40	99,29%
50	99,35%
60	99,34%
70	99,41%

Analisando a tabela anterior, é possível perceber que a partir de 7 neurônios na camada intermediária, as taxas de acertos tendem a incrementar muito pouco e a partir de 30 neurônios, se alcança taxas superiores a 99%. Em virtude de não se notar um incremento significativo nessas taxas a partir da quantidade de 30 neurônios na camada intermediária, esse valor foi adotado provisoriamente durante o desenvolvimento, como uma quantidade ideal limite para este projeto.

A rede PMC com 30 neurônios, que alcançou durante os treinamentos uma taxa global de acertos de 99,15%, obteve uma taxa de 99,22% durante a validação dos dados, para a classificação de seis categorias diferentes de dados. Para se avaliar a capacidade de generalização da rede desenvolvida, foi utilizada a técnica de validação cruzada, através do método k-fold.

Na Tabela 12 é apresentada a matriz de confusão da rede PMC, com 30 neurônios na camada intermediária, quando apresentada aos dados de validação.

Tabela 12 – Matriz de confusão da rede PMC com 30 neurônios na camada intermediária.

RÓTULO\PREDITO	NORMAL	F03-1	F03-2	F03-3	F03-4	F04
NORMAL	99,10%	0,34%	0,14%	0,01%	0,00%	0,41%
F03-1	0,73%	98,35%	0,88%	0,03%	0,00%	0,01%
F03-2	0,29%	0,20%	99,15%	0,35%	0,01%	0,00%
F03-3	0,13%	0,03%	0,14%	99,70%	0,00%	0,00%
F03-4	0,00%	0,00%	0,03%	0,00%	99,97%	0,00%
F04	0,53%	0,01%	0,00%	0,00%	0,04%	99,42%

Com o intuito de se verificar o custo computacional, a rede com 30 neurônios na camada intermediária foi implementada no sistema de monitoramento desenvolvido e em execução no RPI. O sistema de monitoramento mencionado, foi configurado para a cada cinco segundos utilizar a rede PMC para classificar uma amostra e apresentar o resultado através das interfaces gráficas ao usuário. Durante um período de teste de 24 horas, o sistema funcionou sem travamento e não apresentou elevação perceptível no custo computacional.

Após encontrar a melhor configuração de rede PMC com uma camada intermediária, foi construída e testada uma rede com duas camadas intermediárias objetivando verificar se a mesma era mais vantajosa em relação à primeira. No entanto, verificou-se que o uso de duas camadas intermediárias não se mostrou vantajoso em relação à rede de apenas uma camada intermediária.

Na Tabela 13 são apresentadas as taxas de acertos das redes PMC com uma e duas camadas intermediárias. Nela, a comparação das taxas tomou por base as quantidades totais de neurônios em uma e duas camadas intermediárias. Nas redes com duas camadas, o número total de neurônios utilizados foi dividido igualmente entre cada camada.

Tabela 13 – Comparação das taxas de acerto entre redes PMC de uma e duas camadas intermediárias.

CAMADAS\NEURÔNIOS	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12</b>
<b>UMA</b>	89,84%	94,77%	96,70%	97,49%	97,92%	98,32%
<b>DUAS</b>	0,00%	88,88%	94,89%	96,48%	96,29%	98,02%

Analisando a Tabela 13 constatou-se que o uso de duas camadas intermediárias não interfere positivamente na taxa acerto. Como não houve ganhos na utilização dessa configuração de rede, optou-se pela adoção da rede PMC de apenas uma camada intermediária, contendo 30 neurônios.

Por fim, o modelo da rede PMC salvo anteriormente em disco, foi tomado como base para o desenvolvimento do algoritmo detector de falhas de danos e/ou sombreamentos e sujidades em MFVs, apresentado no capítulo anterior.

## 5 Conclusões

Neste trabalho buscou-se desenvolver um sistema de monitoramento capaz de detectar e identificar falhas em SMGFVs. O mesmo, através de placas microcontroladas, foi capaz de coletar dados referentes ao SMGFV monitorado e, através de algoritmos, detectar falhas de desconexão do inversor. Além disso, um *script* foi desenvolvido para detectar sombreamentos, danos e sujeiras nos MFVs, além de identificar qual o MFV afetado. Através de uma interface gráfica, o sistema de monitoramento permite que o usuário faça o acompanhamento local e remoto do funcionamento do SMGFV. Os dados são armazenados localmente e em nuvens, possibilitando futuras consultas.

A construção dos algoritmos para identificação da desconexão do inversor da rede elétrica e da desconexão de *strings* fotovoltaicas foi possível através do tratamento e análise dos dados coletados. Para a detecção de falhas de sombreamento, células defeituosas e sujidade dos MFVs foi utilizado um *script* que se utiliza de um classificador PMC. O mesmo *script*, detector de falhas através da análise das temperaturas das caixas de diodos de *bypass* dos MFVs, é capaz de localizar quais MFVs apresentam sombreamento ou células defeituosas.

O classificador PMC utilizado para detectar falhas, obteve 99,22% de exatidão em seis classes distintas, que foram: dados de funcionamento normal, dados de sombreamento e/ou danos nos MFVs em quatro níveis de gravidade e dados de MFVs sujos. A menor taxa de acerto observada, ao se analisar apenas uma única classe, foi a de dados de sombreamento e/ou danos nos MFVs níveis 1, no valor de 98,35%.

Através da análise dos resultados, percebe-se que o trabalho alcançou os objetivos de monitorar e detectar falhas em SMGFV de forma satisfatória. No entanto, ao comparar o sistema proposto com trabalhos de outros pesquisadores apresentados na fundamentação teórica, o mesmo apresentou vantagens e desvantagens. Considerando que o sistema apresentado nesta dissertação é formado pela união de uma técnica de monitoramento e de técnicas de detecção de falhas, são apresentadas a seguir análises em separado dessas técnicas em comparação às propostas dos trabalhos dos autores apresentados na fundamentação teórica.

Em relação aos trabalhos relacionados com o monitoramento, podemos iniciar comparando com o desenvolvido por [Han, Lee e Kim \(2015\)](#). O sistema aqui proposto apresentou como desvantagem a necessidade de se construir uma rede *wireless* para conectar as placas de coletas de dados entre si, ao invés da utilização dos cabos do próprio SMGFV, como apresentado por [Han, Lee e Kim \(2015\)](#). No entanto, o sistema proposto apresentou como vantagem a baixa complexidade de construção das placas de coleta de dados, bem

como a facilidade de conexão das mesmas em rede. Em relação aos resultados, os dois sistemas foram capazes de monitorar SMGFV.

Quando comparado ao trabalho desenvolvido por [Pereira et al. \(2018\)](#), podemos perceber que os dois sistemas são similares em relação à proposta de monitoramento. A diferença fica por conta do local onde os dados são processados, pois nos sistemas propostos por [Pereira et al. \(2018\)](#), os dados são processados em nuvem e no projeto aqui apresentado, os dados são processados localmente. Os dois sistemas diferem entre si em relação à forma de transmissão dos dados das placas de coletas para o RPi, no entanto os resultados obtidos são basicamente os mesmos. Outro ponto a observar é o fato de que em caso de falhas de conexão com a internet, o sistema proposto por [Pereira et al. \(2018\)](#) perde a capacidade de monitorar, enquanto o sistema apresentado aqui possui a vantagem de poder continuar funcionando independente do estado da conexão com a internet.

Ainda falando sobre monitoramento, o trabalho desenvolvido por [Choi et al. \(2017\)](#) tem funcionamento similar a este projeto. A diferença entre os sistemas fica por conta das redes *wireless* utilizadas para conectar as placas coletoras de dados aos RPis e das *interfaces* utilizadas para visualização dos dados. [Choi et al. \(2017\)](#) utiliza uma rede SUN para conexão das placas e um aplicativo para *smartphone* para visualização local dos dados publicados no *Broker* MQTT, instalado no RPi. Por outro lado, o sistema proposto nesta dissertação utiliza uma rede *Wi-Fi* para conexão das placas, um servidor Node-RED, instalado no RPi, é utilizado para visualização local dos dados e o aplicativo Telegram é utilizado para visualização remota. Apesar da rede SUN ser uma rede robusta, de alto desempenho e de longo alcance, a utilização da rede *Wi-Fi* se mostra mais vantajosa para a proposta deste trabalho, pois o foco é o monitoramento de SMGFVs. Como já apresentado no capítulo 2, a utilização de redes *Wi-Fi* é muito comum pelos usuários de SMGFVs, o que facilita a adoção desse tipo de rede para a implementação do sistema de monitoramento proposto. O uso do aplicativo Telegram também é um diferencial positivo para visualização remota, pois o aplicativo pode ser baixado e utilizado facilmente em PCs, *notebooks* e *smartphones*.

Em relação à detecção de falhas, o sistema proposto é semelhante à solução apresentada por [Cristaldi, Leone e Vergura \(2016\)](#). Como já mencionado anteriormente, o sistema proposto neste trabalho é capaz de detectar cinco classes de falhas que possam ocorrer em SMGFVs através da utilização de um *script* baseado em uma rede PMC, já [Cristaldi, Leone e Vergura \(2016\)](#) propõem utilizar a rede PMC para detecção da perda de desempenho de SMGFVs. Ambas as soluções se utilizam de dados de temperaturas dos módulos, irradiância e energia elétrica produzida, além de focarem em medições no *string* FV, no entanto, o sistema de detecção proposto aqui é mais abrangente, focando na detecção ao nível dos MFVs.

Por fim podemos verificar através da análise dos resultados obtidos e da comparação

com trabalhos de outros autores que o sistema aqui proposto é capaz de monitorar e detectar falhas em SMGFV. O sistema desenvolvido encontra-se atualmente monitorando e detectando falhas. Ressaltando que este sistema é modular, construído com componentes de fácil acesso e ainda utiliza parâmetros de fácil aquisição.

## 5.1 Trabalhos futuros

Algumas sugestões para futuras melhorias encontram-se listadas abaixo:

- Aperfeiçoamento do piranômetro desenvolvido neste projeto, melhorando assim a sua precisão;
- Coletar dados por um período maior de tempo, visando englobar uma maior variedade de cenários climáticos;
- Coletar dados de falhas tipo F04, gerados pelo acúmulo natural de poeira e sujeira nos MFVs.
- Adicionar mais SMGFVs ao sistema de monitoramento e detecção de falhas para verificação da sua performance diante de processamento maior de dados.

# Referências

- ALLEGRO, M. I. Allegro microsystems inc. acs712 - datasheet. 2017. Acessado em 21/02/2018. Disponível em: <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/168326/ALLEGRO/ACS712.html>>.
- ANEEL. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema nacional – prodist; modulo 3 – acesso ao sistema de distribuição. revisão 7. 2017.
- BANAVAR, M. et al. Signal processing for solar array monitoring, fault detection, and optimization. **Synthesis Lectures on Power Electronics**, Morgan & Claypool Publishers, v. 7, n. 1, p. 1–95, 2012.
- BOLZAN, M. B. **Desenvolvimento de um piranômetro baseado em componentes semicondutores**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2014.
- CANADIANSOLAR. **PV Module - Datasheet CS6K-260|265|270|275P**. [S.l.], 2016.
- CASTRO, M. A. L. Regulatory scenarios for microgeneration in brazil and its impacts in the next decade. In: IEEE. **Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2015 IEEE**. [S.l.], 2015. p. 463–467.
- CHEN, L.; WANG, X. Adaptive fault localization in photovoltaic systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, 2017.
- CHOI, C.-S. et al. Implementation of iot based pv monitoring system with message queuing telemetry transfer protocol and smart utility network. In: IEEE. **Information and Communication Technology Convergence (ICTC), 2017 International Conference on**. [S.l.], 2017. p. 1077–1079.
- COELHO, B. N. et al. Desenvolvimento de um sistema de monitoramento fotovoltaico baseado em power line communication. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016.
- COMMISSION, I. E. et al. Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis. **IEC 61724**, 1998.
- CRESESB. **Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos**. [S.l.]: Rio de Janeiro, 2014. 530 p.
- CRISTALDI, L.; LEONE, G.; VERGURA, S. Neural network-based diagnostics for pv plant. In: IEEE. **Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016 IEEE 16th International Conference on**. [S.l.], 2016. p. 1–6.
- EBC, E. B. de C. S. **Chuvas de dezembro devem melhorar situação dos reservatórios do país, diz comitê**. 2017. <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2017-12/chuvas-de-dezembro-devem-melhorar-situacao-dos-reservatorios-do-pais-diz>>. Acessado em 08/04/2018.
- ELECENA. **Sensor de corrente ACS712-30A - Site de venda de componentes**. 2018. <<https://elecena.pl/search?q=acs712&p=4>>. Acessado em 21/02/2018.

- EPE, E. D. P. E. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL: Séries Históricas Completas**. 2017. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>>.
- EPE, E. D. P. E. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL: Relatório Síntese, ano base 2017**. 2018.
- ESPRESSIF. **ESP8266EX - Datasheet**. 2018. <[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf)>. Acessado em 15/06/2018.
- FREIRE, L. A. D. **Desenvolvimento de um piranômetro fotovoltaico**. Dissertação (Mestrado) — Recife, 2008.
- FRONIUS. **Fronius solar.web - Entender melhor a sua central de energia solar**. 2018. <<https://www.solarweb.com>>.
- GERHKE, R. J. **Desenvolvimento e calibração de um piranômetro de baixo custo**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IFSC, 2016.
- HAAG, R. **Desenvolvimento de um radiômetro espectral e metodologia para caracterização do espectro solar**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.
- HALMEMAN, R. J. **Desenvolvimento de um sistema para monitoramento remoto em centrais de microgeração fotovoltaica**. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2014.
- HAN, J.; LEE, I.; KIM, S.-H. User-friendly monitoring system for residential pv system based on low-cost power line communication. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, IEEE, v. 61, n. 2, p. 175–180, 2015.
- IBGE. **PNAD Contínua TIC 2016: 94,2% das pessoas que utilizaram a Internet o fizeram para trocar mensagens**. 2018. <<https://tinyurl.com/vs9nk6ad>>. Acessado em 16/06/2018.
- INEE. **O que é geração distribuída. Instituto Nacional de Eficiência Energética - INEE**. 2018. <[http://www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp)>.
- JIANG, L. L.; MASKELL, D. L. Automatic fault detection and diagnosis for photovoltaic systems using combined artificial neural network and analytical based methods. In: **IEEE. Neural Networks (IJCNN), 2015 International Joint Conference on**. [S.l.], 2015. p. 1–8.
- LIU, J. et al. Application of power line communication in smart power consumption. In: **IEEE. Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), 2010 IEEE International Symposium on**. [S.l.], 2010. p. 303–307.
- LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. [S.l.]: John Wiley & Filhos, 2003.
- MADETI, S. R.; SINGH, S. Monitoring system for photovoltaic plants: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 67, p. 1180–1207, 2017.

- MESSENGER, R.; VENTRE, J. **Photovoltaic Systems Engineering**. Third edition. [S.l.]: CRC press, 2010.
- NAZIAZENO, R. N. **Construção, calibração e análise de desempenho de um piranômetro de baixo custo, baseado no modelo Kimball-Hobbs**. Dissertação (Mestrado) — Natal, 2009.
- NODEMCU. **NodeMCU DEVKIT V1.0**. 2018. <<https://github.com/nodemcu>>.
- PEREIRA, R. I. et al. Iot embedded linux system based on raspberry pi applied to real-time cloud monitoring of a decentralized photovoltaic plant. **Measurement**, Elsevier, v. 114, p. 286–297, 2018.
- PHB, E. L. **STRING BOX CC+CA – PHB – 2 STRINGS**. 2018. <[http://www.solcentral.com.br/wp-content/uploads/2016/04/PHB\\_StringBox\\_Monofasico\\_CCCA\\_2Strings\\_pt-br.pdf](http://www.solcentral.com.br/wp-content/uploads/2016/04/PHB_StringBox_Monofasico_CCCA_2Strings_pt-br.pdf)>.
- RASPBERRYPI, F. **DOCUMENTATION - INSTALLATION**. 2018. <<https://www.raspberrypi.org/documentation/installation/>>. Acessado em 18/03/2018.
- RASPBERRYPI, F. **RASPBERRY PI 3 MODELO B**. 2018. <<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>>. Acessado em 18/03/2018.
- ROSIEK, S.; BATLLES, F. A microcontroller-based data-acquisition system for meteorological station monitoring. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 49, n. 12, p. 3746–3754, 2008.
- SANCHEZ-PACHECO, F. J. et al. Plc-based pv plants smart monitoring system: field measurements and uncertainty estimation. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, IEEE, v. 63, n. 9, p. 2215–2222, 2014.
- SHAREENERGY. **Celula Fotovoltaica - SHAREENERGY**. 2018. <<http://shareenergy.com.br/wp-content/uploads/2017/10/Celula-fotovoltaica-01.png>>. Acessado em 11/05/2018.
- SILVA, I. N. d.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes neurais artificiais: para engenharia e ciências aplicadas**. [S.l.]: São Paulo: Artliber, 2010.
- SOLAR-ENERGIA. **Tipos de células fotovoltaicas - SOLAR-ENERGIA**. 2018. <<https://pt.solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/tipos-celulas-fotovoltaicas>>. Acessado em 15/05/2018.
- SOLAR, I. **ENTENDA MAIS SOBRE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS - INOVARE SOLAR**. 2018. <<http://inovaresolar.com.br/index.php/2016/07/06/entenda-mais-sobre-paineis-fotovoltaicos/>>. Acessado em 15/05/2018.
- SOLAREEDGE. **Europe solar world - SolarEdge**. 2018. <[https://europesolarworld.com/\\_files/200000024-1aff61bf64/Edge.jpg](https://europesolarworld.com/_files/200000024-1aff61bf64/Edge.jpg)>. Acessado em 11/05/2018.
- STANSBERRY, J. Mqtt and coap: Underlying protocols for the iot. **Electronic Design**, 2015.
- VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2015.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. **São Paulo: Érica**, 2012.

VISHAY, S. Vishay semiconductors. 4n35 - datasheet. 2010. Acessado em 21/02/2018. Disponível em: <<https://www.vishay.com/docs/81181/4n35.pdf>>.

ZANESCO, I. **Análise e construção de um piranômetro fotovoltaico**. Dissertação (Mestrado) — Porto Alegre, 1991.

# Apêndices

# APÊNDICE A – Desenvolvimento do piranômetro

## A.1 Componentes utilizados

Na tabela 14 são apresentadas as referências dos componentes utilizados e suas quantidades.

Tabela 14 – Componentes utilizados

Item	Descrição	Modelo	Quantidade
1	Placa microcontrolada	NodeMCU ESP-12E	1
2	Diodo infravermelho	TSAL6200	1

## A.2 Algoritmo desenvolvido no OCTAVE para visualização e comparação dos dados coletados

A base de dados utilizada por esses *scripts* e os próprios *scripts* estão disponíveis para *download* no [repositório online](#)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Endereço eletrônico para *download* dos dados e *scripts* utilizados: <<https://github.com/MaurilioPereira/PPGER>>. Caso encontre problemas com o *link* disponibilizado ou deseje informações adicionais, contate [mauriliopereira@ppger.ifce.edu.br](mailto:mauriliopereira@ppger.ifce.edu.br)

# APÊNDICE B – Desenvolvimento da placa de coleta de informações de correntes e tensões

## B.1 Componentes utilizados

Na tabela 15 são apresentadas as referências dos componentes utilizados e suas quantidades.

Tabela 15 – Componentes utilizados

Item	Descrição	Modelo	Quantidade
1	Placa microcontrolada	NodeMCU ESP-12E	1
2	Sensor de corrente para 20A	ACS712	2
3	CI Multiplexador/Demultiplexador	CI 4051B	1
4	CI optoacoplador	CI 4N35	2
5	Resistor	10 k $\Omega$	5
6	Resistor	68 k $\Omega$	1
7	Resistor	560 $\Omega$	2
8	Diodo retificador	1N4007	4

## B.2 Esquema eletrônico da placa

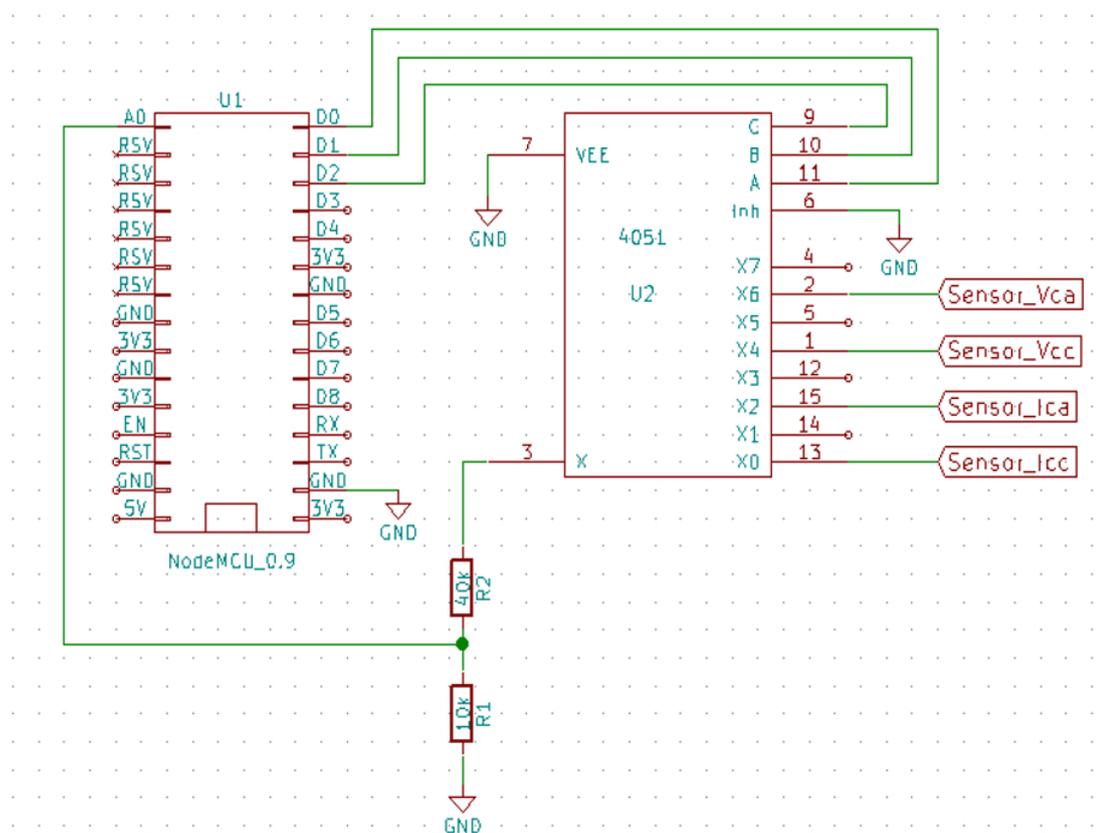
Na Figura 67 é apresentado o esquema eletrônico da interligação entre o NodeMCU, o CI4051 e as saídas dos sensores.

## B.3 Algoritmo desenvolvido na Arduino IDE e gravado no NodeMCU

O *script* está disponível para *download* no [repositório online](#)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Endereço eletrônico para *download* dos dados e *scripts* utilizados: <<https://github.com/MaurilioPereira/PPGER>>. Caso encontre problemas com o *link* disponibilizado ou deseje informações adicionais, contate mauriliopereira@ppger.ifce.edu.br

Figura 67 – Esquema eletrônico da interligação entre o NodeMCU, o CI4051 e as saídas dos sensores



Fonte: Autoria Própria

# APÊNDICE C – Placa de medição de temperaturas

## C.1 Componentes utilizados

Na tabela 16 são apresentadas as referências dos componentes utilizados e suas quantidades.

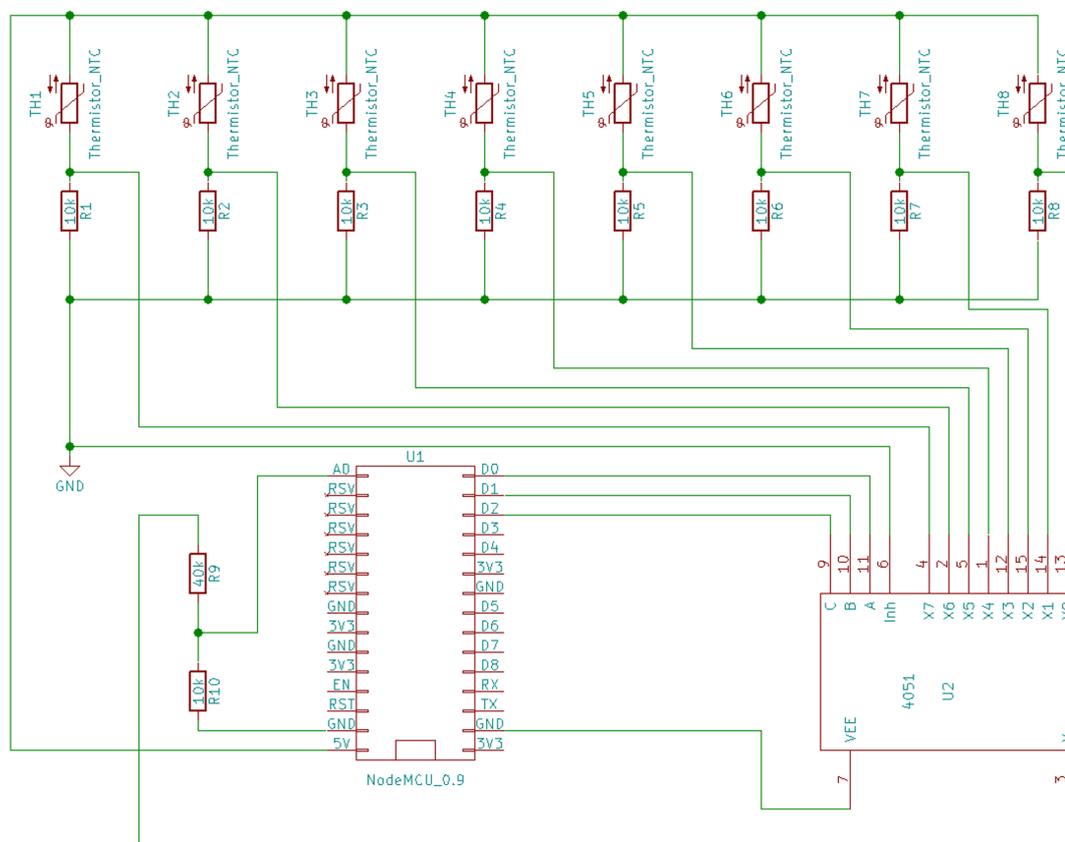
Tabela 16 – Componentes utilizados na confecção da placa

Item	Descrição	Modelo	Quantidade
1	Placa microcontrolada	NodeMCU ESP-12E	1
2	CI Multiplexador/Demultiplexador	CI 4051B	1
3	Resistor	10 k $\Omega$	9
4	Resistor	40k $\Omega$	1
5	Termistor NTC	10 k $\Omega$	8

## C.2 Esquema eletrônico da placa

Na Figura 68 é apresentado o esquema eletrônico da interligação entre o NodeMCU, o CI4051 e os sensores.

Figura 68 – Esquema eletrônico da placa de aquisição de temperaturas dos módulos.



Fonte: Autoria Própria

### C.3 Algoritmo desenvolvido na Arduino IDE e gravado no NodeMCU

O *script* está disponível para *download* no [repositório online](#)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Endereço eletrônico para *download* dos dados e *scripts* utilizados: <<https://github.com/MaurilioPereira/PPGER>>. Caso encontre problemas com o *link* disponibilizado ou deseje informações adicionais, contate mauriliopereira@ppger.ifce.edu.br

# APÊNDICE D – Sistema de monitoramento e detecção de falhas desenvolvido através do Node-RED

A seguir são apresentadas imagens das telas da *interface* do sistema de monitoramento e detecção de falhas desenvolvido através da ferramenta Node-RED. O *script* do sistema de monitoramento está disponível para *download* no [repositório online](#)<sup>1</sup>.

## D.0.1 Interfaces

Para que o usuário possa manter-se informado sobre o funcionamento do sistema de geração, foram desenvolvidas duas interfaces: uma local e uma remota. A local é executada através de navegador *web* de dispositivos conectados a mesma rede utilizada pelo sistema de monitoramento, enquanto a remota é executada através do aplicativo *Telegram*. Para a interface local foram desenvolvidas três telas para disponibilizar informações. Para o acesso à tela inicial do sistema, é necessário apenas acessar o endereço IP *192.168.0.33:8080* e a partir daí é possível obter informação básicas sobre o monitoramento e navegar entre as abas disponíveis, onde são disponibilizadas informações sobre as condições climáticas atuais do local, irradiância solar medida pelo piranômetro, valor de potência instantânea do sistema, o estado do sistema e ainda o gráfico da potência gerada em tempo real. Existem também dois botões de comando denominados ENVIAR e SILENCIAR. Caso o usuário pressione o primeiro, o sistema envia os dados coletados desde o último *backup* para o grupo do *Telegram* em que o *bot* AVA está participando. O botão SILENCIAR, por sua vez, executa essa função quando o *buzzer* conectado ao RPi está sinalizando algo. Na Figura 69 pode-se ver a tela inicial, nomeada de HOME, contendo as informações descritas acima.

---

<sup>1</sup> Endereço eletrônico para *download* dos dados e *scripts* utilizados: <<https://github.com/MaurilioPereira/PPGER>>. Caso encontre problemas com o *link* disponibilizado ou deseje informações adicionais, contate [mauriliopereira@ppger.ifce.edu.br](mailto:mauriliopereira@ppger.ifce.edu.br)

Figura 69 – Tela HOME da interface gráfica local.



Fonte: Autoria Própria

Além da tela inicial, a *interface* fornece outras três telas para visualização de informações, que podem ser acessadas pelo usuário através da seleção das abas do MENU, localizado no canto superior esquerdo da tela. No citado menu, pode-se selecionar as abas PIRANÔMETRO, SISTEMA 01 e PPGER. Caso haja mais de um sistema sendo monitorado, outras abas estarão disponíveis com a nomenclaturas SISTEMA 02, SISTEMA 03 e assim por diante. Na Figura 70 é possível visualizar, no canto esquerdo da imagem, a localização do MENU do sistema.

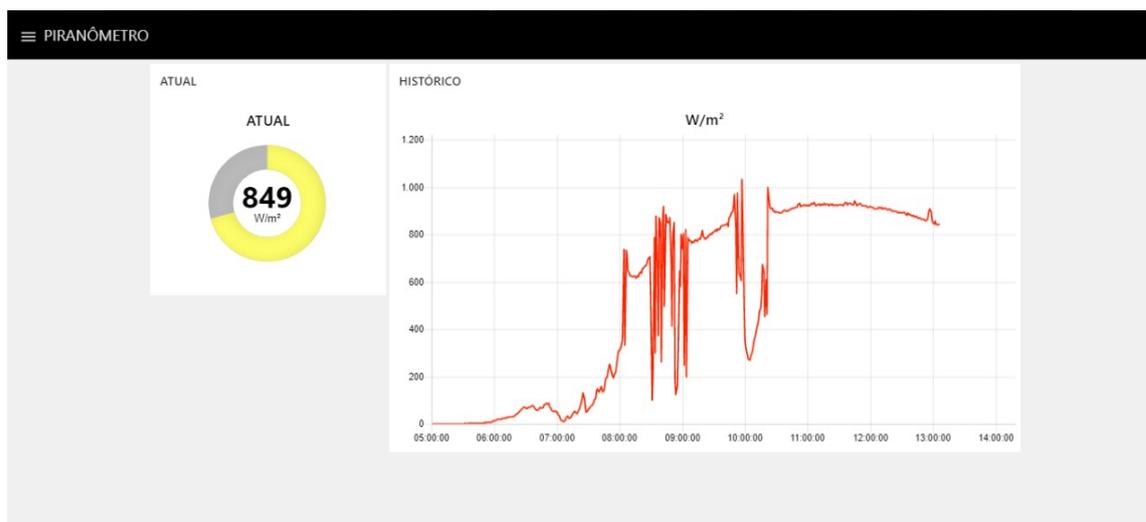
Figura 70 – Visualização do MENU do sistema de monitoramento.



Fonte: Autoria Própria

Na tela PIRANÔMETRO, são disponibilizadas informações de irradiância atual e das últimas 12 horas do local onde o sistema monitorado encontra-se instalado. Na Figura 71 é possível visualizar essa tela.

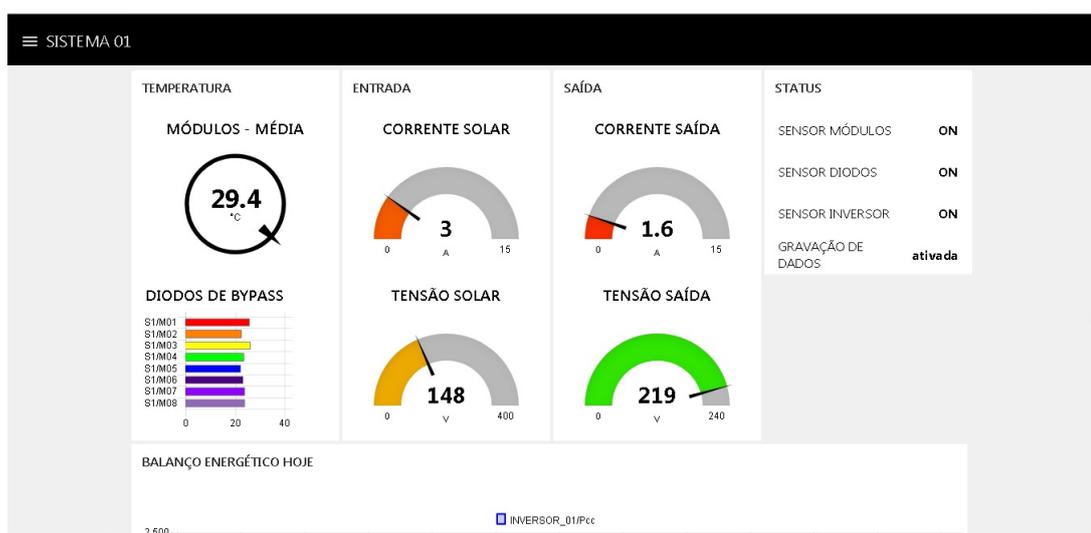
Figura 71 – Tela PIRANÔMETRO da interface gráfica local.



Fonte: Aatoria Própria

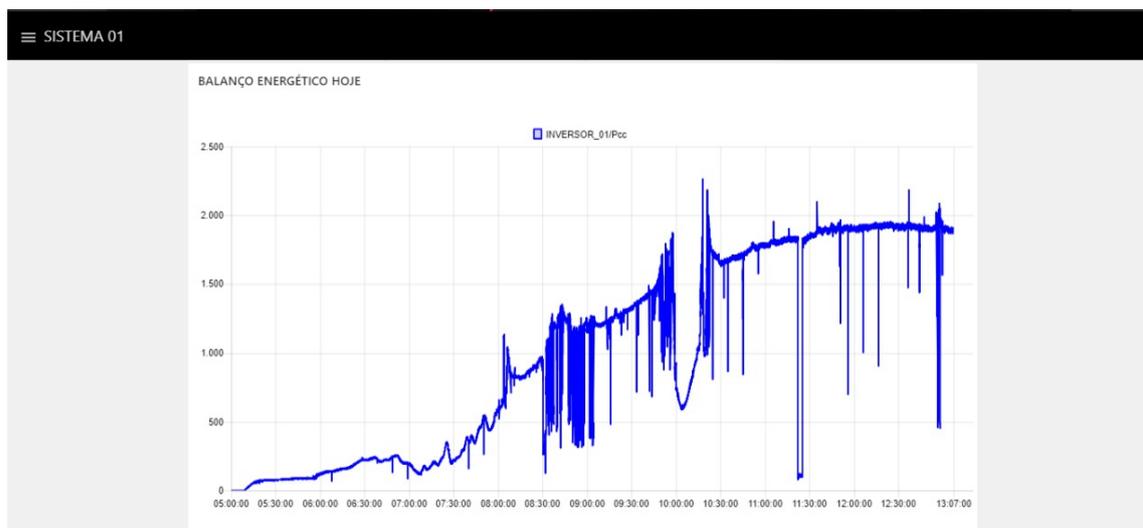
A tela SISTEMA 01 disponibiliza os dados coletados do SMGFV N° 01. Nela são apresentadas as informações: temperatura média dos módulos; temperatura individual de cada caixa de diodo de *bypass* dos módulos; corrente e tensão medidas na entrada do inversor; corrente e tensão de saída do inversor, além de um gráfico da potência gerada. Na Figura 72 é possível visualizar a tela SISTEMA 01 e na Figura 73, o gráfico da potência gerada.

Figura 72 – Tela SISTEMA 01 da interface gráfica local.



Fonte: Aatoria Própria

Figura 73 – Gráfico da potência gerada visível na tela SISTEMA 01 da interface gráfica local.



Fonte: Autoria Própria

Selecionando na aba MENU, a opção PPGER, o usuário é direcionado para a página do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis - PPGER. Nessa página pode-se visualizar mais informações sobre o projeto do sistema de monitoramento para microgeração fotovoltaica e sobre o Programa de Pós-Graduação.

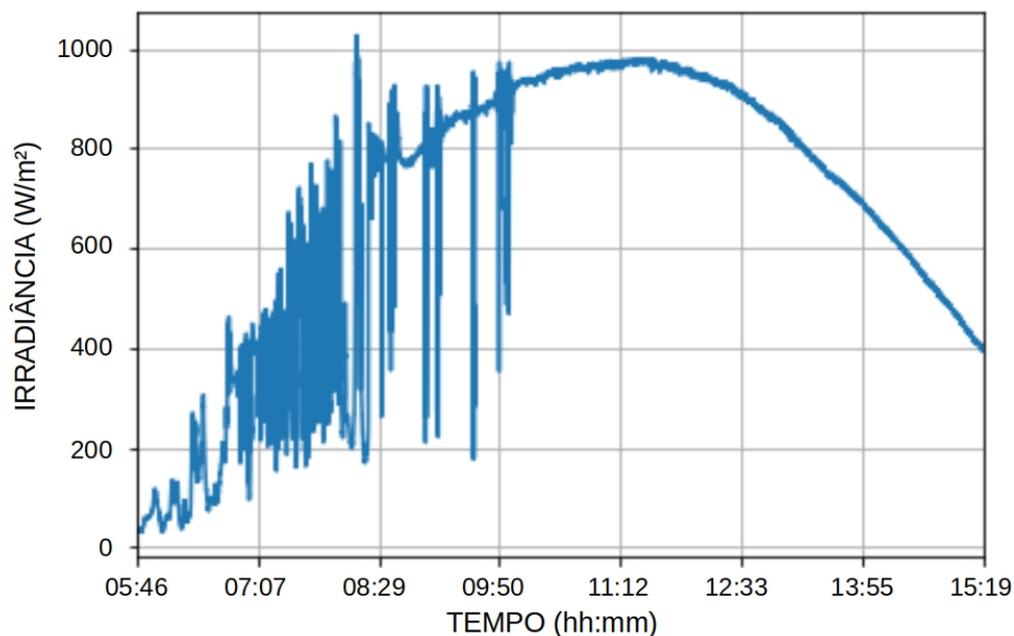
# APÊNDICE E – Visualização de dados de irradiância solar

A seguir são apresentados gráficos de irradiância solar gerados a partir dos dados utilizados para o treinamento das redes neurais desenvolvidas neste projeto. A base de dados utilizada por esses gráficos está disponível para *download* no [repositório online](#)<sup>1</sup>.

## E.1 Dados de funcionamento normal

Na Figura 74 é apresentado o gráfico de irradiância solar dos dados coletados em 18/07/2018 das 05:46h às 15:19h. Durante essa coleta, o SMGFV estava funcionando corretamente, com os seus módulos FV limpos e sem sombreamento ou danos.

Figura 74 – Funcionamento normal - 18/07/2018 das 05:46h às 15:19h



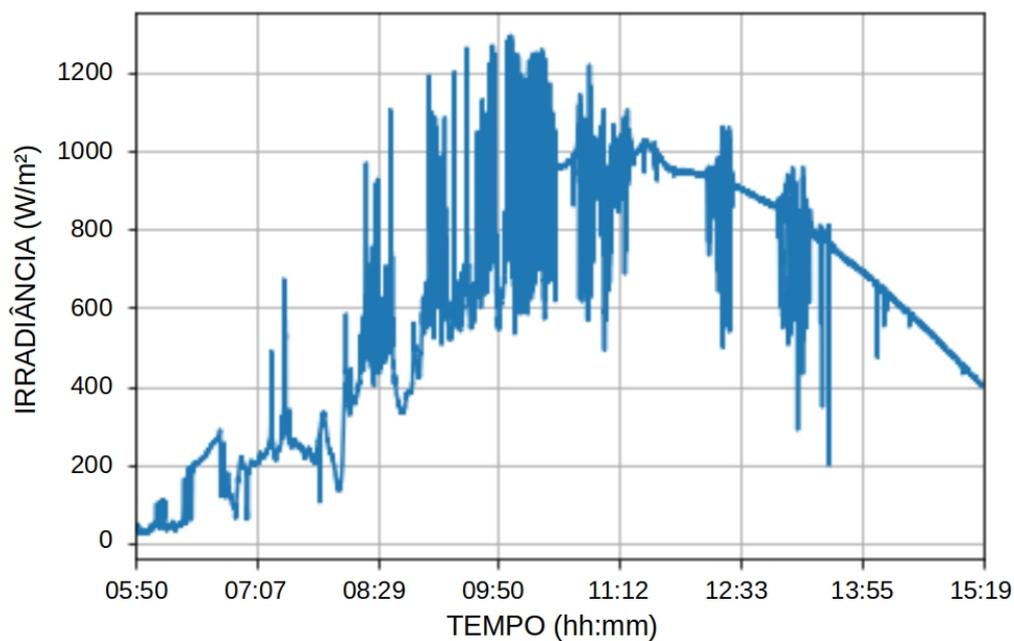
Fonte: Autoria Própria

<sup>1</sup> Endereço eletrônico para *download* dos dados e *scripts* utilizados: <<https://github.com/MaurilioPereira/PPGER>>. Caso encontre problemas com o *link* disponibilizado ou deseje informações adicionais, contate [mauriliopereira@ppger.ifce.edu.br](mailto:mauriliopereira@ppger.ifce.edu.br)

## E.2 Dados de funcionamento com falhas do tipo F03 níveis 1, 2 e 3

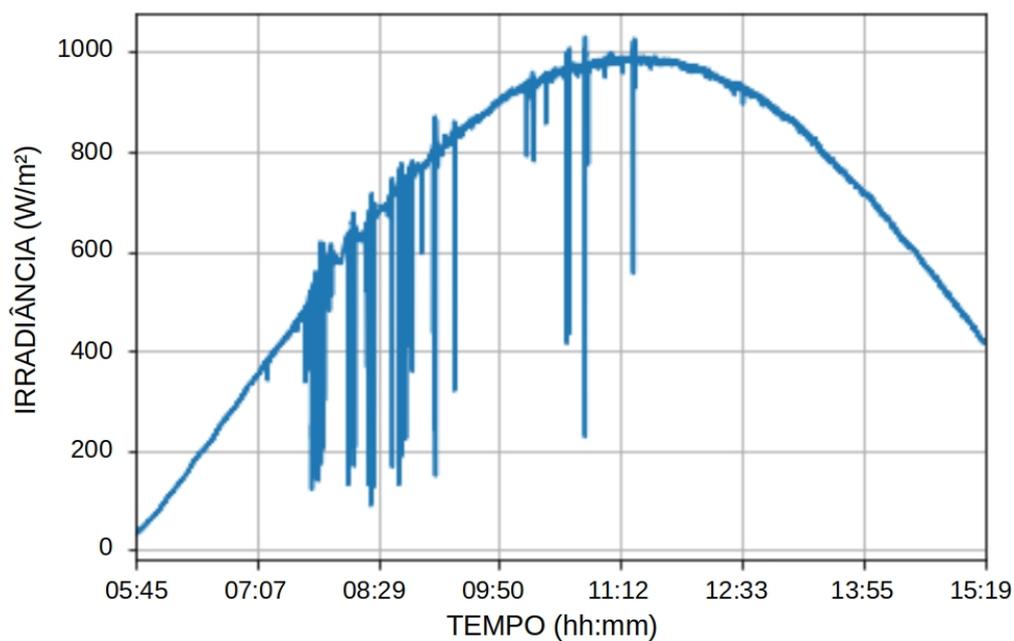
Nas Figuras 75, 76 e 77 são apresentados, respectivamente, os gráficos de irradiância solar dos dados coletados em 20/07/2018 das 05:50h às 15:19h, 25/07/2018 das 05:45h às 15:19h e 31/07/2018 das 05:50h às 15:19h.

Figura 75 – Funcionamento com falha F03-1 - 20/07/2018 das 05:50h às 15:19h



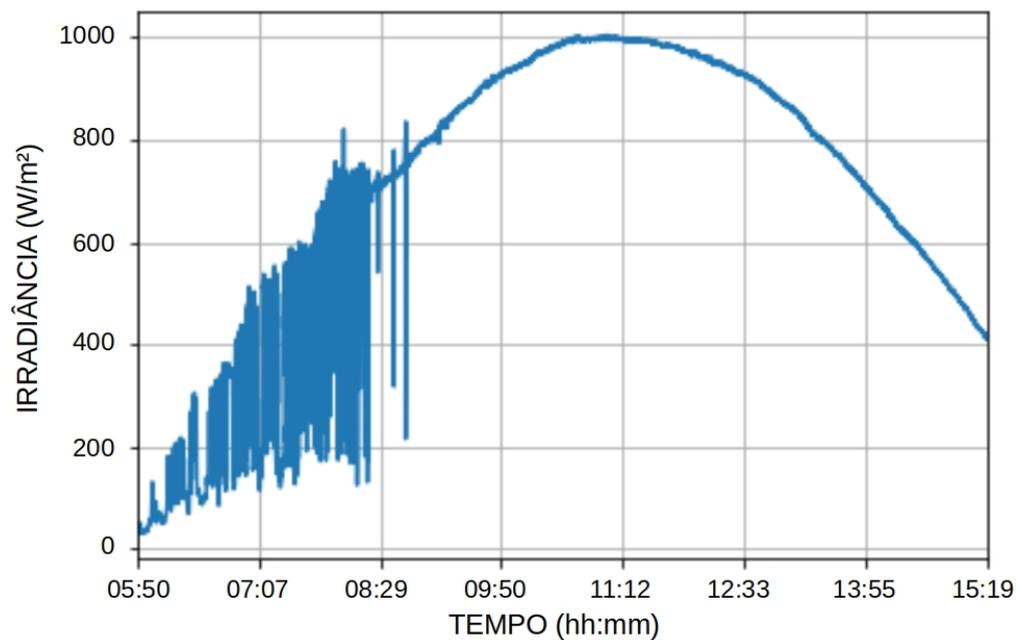
Fonte: Autoria Própria

Figura 76 – Funcionamento com falha F03-2 - 25/07/2018 das 05:45h às 15:19h



Fonte: Autoria Própria

Figura 77 – Funcionamento com falha F03-3 - 31/07/2018 das 05:50h às 15:19h.

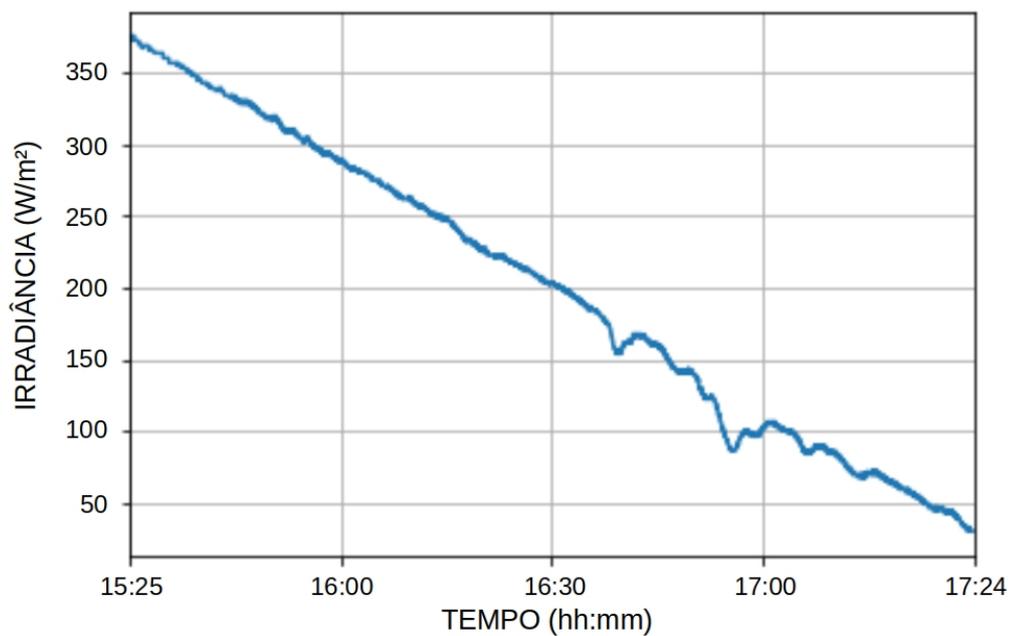


Fonte: Autoria Própria

### E.3 Dados de funcionamento com falhas do tipo F03-4

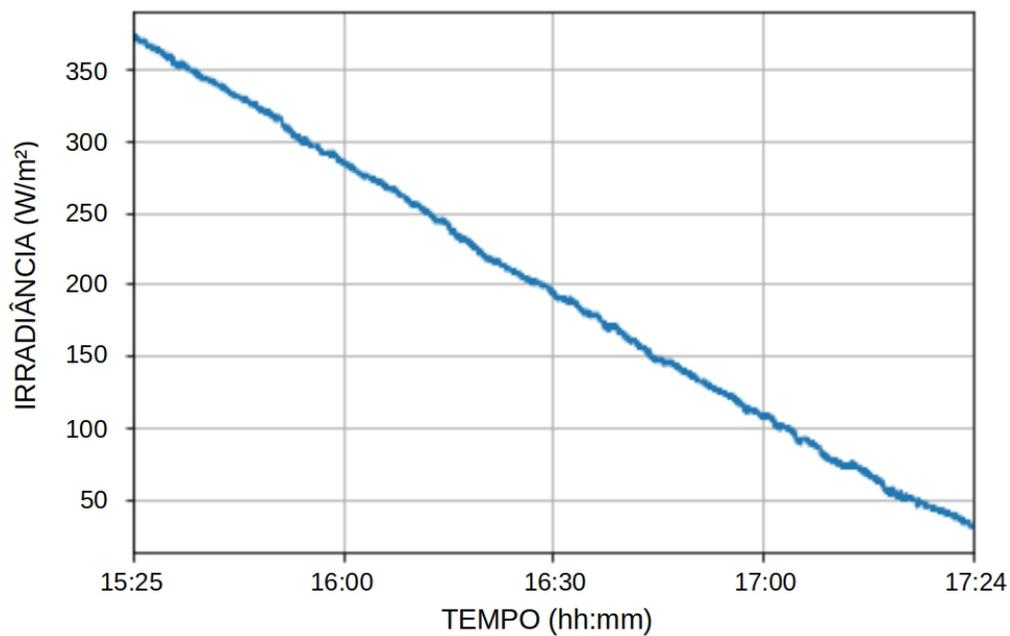
Nas Figuras 78, 79, 80 e 81 são apresentados os gráficos de irradiância solar dos dados coletados entre os dias 15/07/2018 a 18/07/2018 das 15:25h às 17:24h.

Figura 78 – Funcionamento com falha F03-4 - 15/07/2018 das 15:25h às 17:24h.



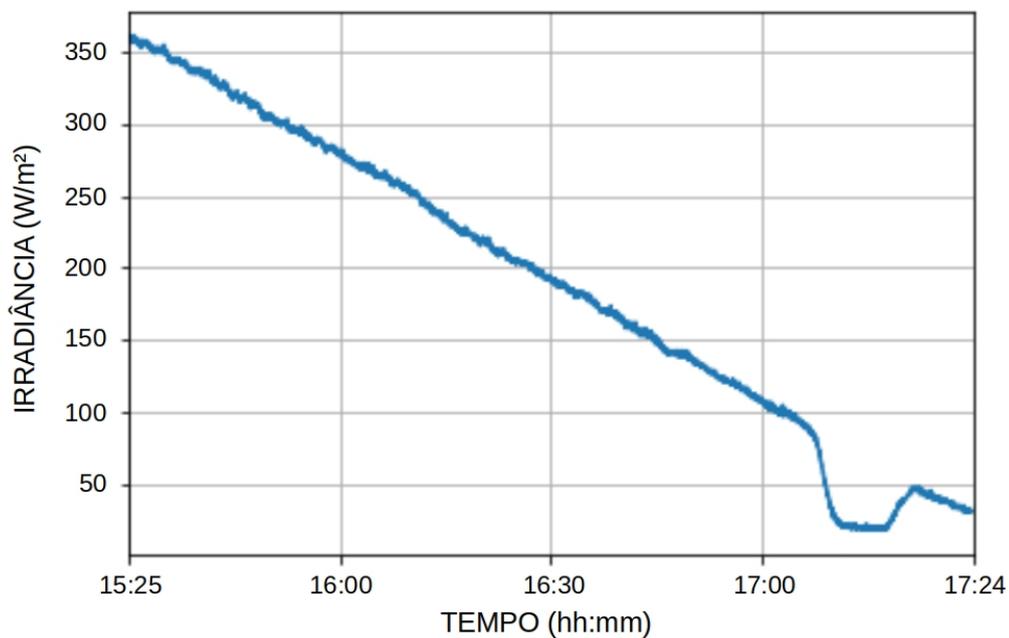
Fonte: Autoria Própria

Figura 79 – Funcionamento com falha F03-4 - 16/07/2018 das 15:25h às 17:24h.



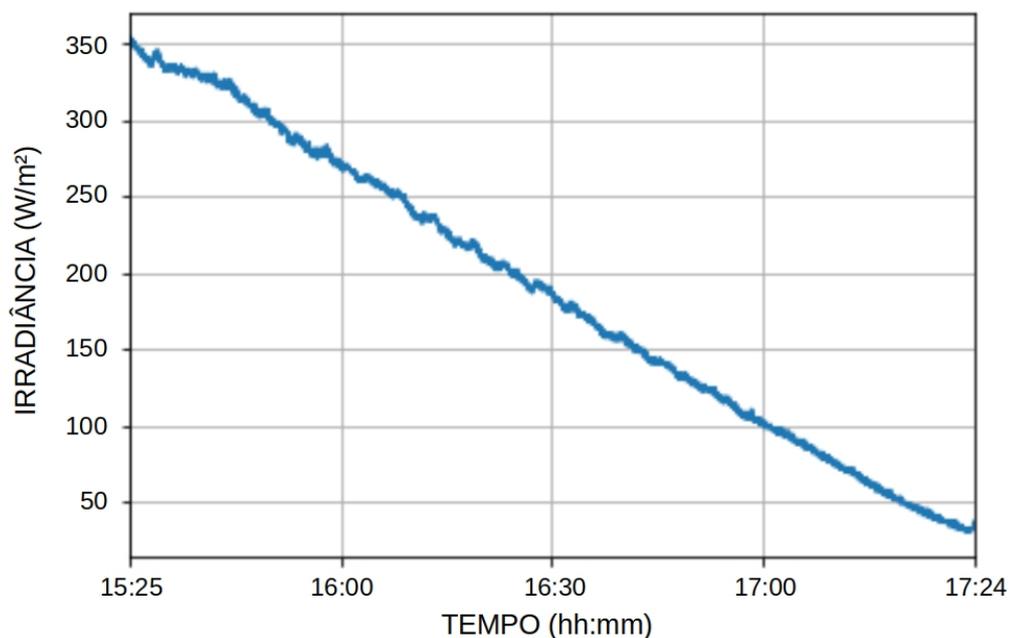
Fonte: Autoria Própria

Figura 80 – Funcionamento com falha F03-4 - 17/07/2018 das 15:25h às 17:24h.



Fonte: Autoria Própria

Figura 81 – Funcionamento com falha F03-4 - 18/07/2018 das 15:25h às 17:24h.

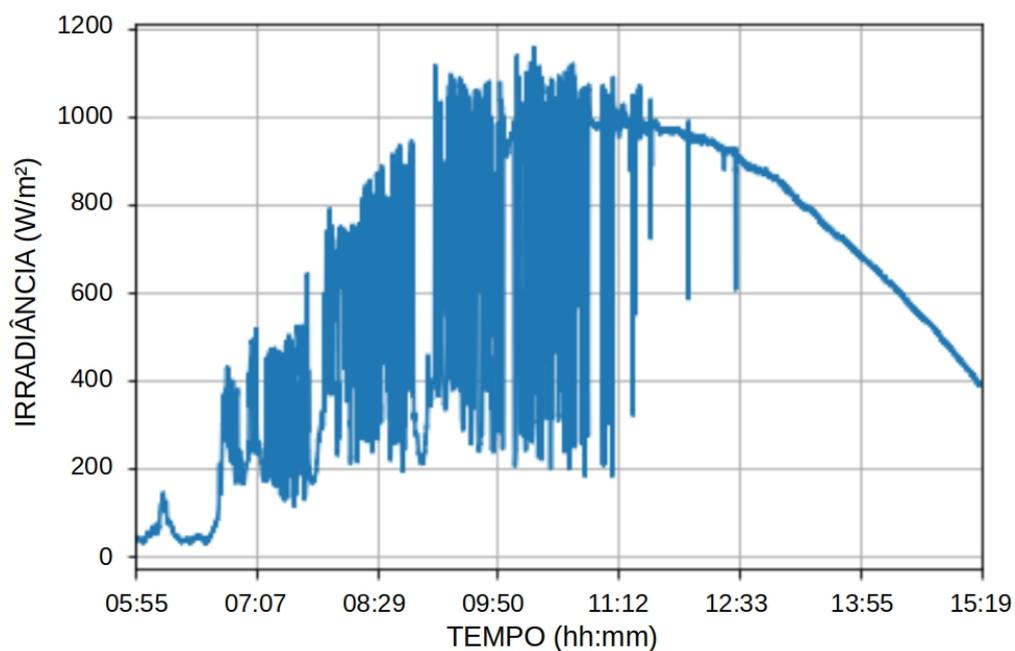


Fonte: Autoria Própria

#### E.4 Dados de funcionamento com falhas do tipo F04

Na Figura 82 é apresentado o gráfico de irradiância solar dos dados coletados em 19/07/2018 das 05:55h às 15:19h.

Figura 82 – Funcionamento com falha F03-4 - 19/07/2018 das 05:55h às 15:19h.



Fonte: Autoria Própria

# APÊNDICE F – Classificadores, *script* detector de falhas e conjunto de dados

Os dados utilizados para o desenvolvimento dos classificadores *Perceptron* e *PMC*, além dos *scripts* dessas redes e do identificador e classificador de falhas estão disponíveis para *download* no [repositório online](#)<sup>1</sup>.

---

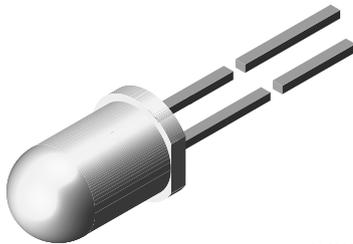
<sup>1</sup> Endereço eletrônico para *download* dos dados e *scripts* utilizados: <<https://github.com/MaurilioPereira/PPGER>>. Caso encontre problemas com o *link* disponibilizado ou deseje informações adicionais, contate [mauriliopereira@ppger.ifce.edu.br](mailto:mauriliopereira@ppger.ifce.edu.br)

# Anexos

ANEXO A – *Data Sheet* do fotodiodo  
TSAL6200



# High Power Infrared Emitting Diode, 940 nm, GaAlAs, MQW



94 8389

## DESCRIPTION

TSAL6200 is an infrared, 940 nm emitting diode in GaAlAs multi quantum well (MQW) technology with high radiant power and high speed molded in a blue-gray plastic package.

## FEATURES

- Package type: leaded
- Package form: T-1 $\frac{3}{4}$
- Dimensions (in mm):  $\varnothing$  5
- Peak wavelength:  $\lambda_p = 940$  nm
- High reliability
- High radiant power
- High radiant intensity
- Angle of half intensity:  $\varphi = \pm 17^\circ$
- Low forward voltage
- Suitable for high pulse current operation
- Good spectral matching with Si photodetectors
- Material categorization: For definitions of compliance please see [www.vishay.com/doc?99912](http://www.vishay.com/doc?99912)



## APPLICATIONS

- Infrared remote control units with high power requirements
- Free air transmission systems
- Infrared source for optical counters and card readers

PRODUCT SUMMARY				
COMPONENT	$I_e$ (mW/sr)	$\varphi$ (deg)	$\lambda_p$ (nm)	$t_r$ (ns)
TSAL6200	72	$\pm 17$	940	15

### Note

- Test conditions see table "Basic Characteristics"

ORDERING INFORMATION			
ORDERING CODE	PACKAGING	REMARKS	PACKAGE FORM
TSAL6200	Bulk	MOQ: 4000 pcs, 4000 pcs/bulk	T-1 $\frac{3}{4}$

### Note

- MOQ: minimum order quantity

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ( $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise specified)				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Reverse voltage		$V_R$	5	V
Forward current		$I_F$	100	mA
Peak forward current	$t_p/T = 0.5, t_p = 100 \mu\text{s}$	$I_{FM}$	200	mA
Surge forward current	$t_p = 100 \mu\text{s}$	$I_{FSM}$	1.5	A
Power dissipation		$P_V$	160	mW
Junction temperature		$T_j$	100	$^\circ\text{C}$
Operating temperature range		$T_{amb}$	-40 to +85	$^\circ\text{C}$
Storage temperature range		$T_{stg}$	-40 to +100	$^\circ\text{C}$
Soldering temperature	$t \leq 5$ s, 2 mm from case	$T_{sd}$	260	$^\circ\text{C}$
Thermal resistance junction/ambient	J-STD-051, leads 7 mm soldered on PCB	$R_{thJA}$	230	K/W

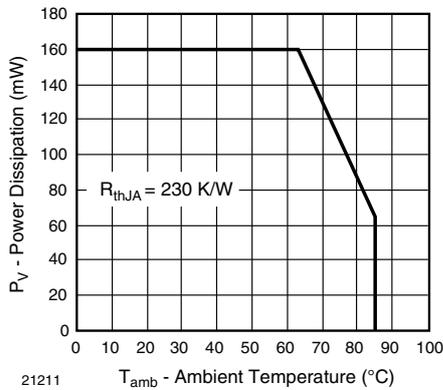


Fig. 1 - Power Dissipation Limit vs. Ambient Temperature

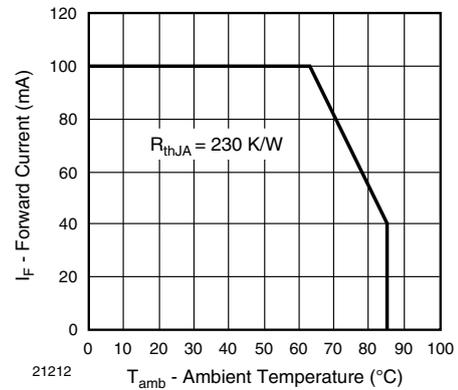


Fig. 2 - Forward Current Limit vs. Ambient Temperature

BASIC CHARACTERISTICS ( $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified)						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Forward voltage	$I_F = 100\text{ mA}$ , $t_p = 20\text{ ms}$	$V_F$		1.35	1.6	V
	$I_F = 1\text{ A}$ , $t_p = 100\text{ }\mu\text{s}$	$V_F$		2.2	3	V
Temperature coefficient of $V_F$	$I_F = 1\text{ mA}$	$TK_{V_F}$		-1.8		mV/K
Reverse current	$V_R = 5\text{ V}$	$I_R$			10	$\mu\text{A}$
Junction capacitance	$V_R = 0\text{ V}$ , $f = 1\text{ MHz}$ , $E = 0$	$C_j$		40		pF
Radiant intensity	$I_F = 100\text{ mA}$ , $t_p = 20\text{ ms}$	$I_e$	40	72	200	mW/sr
	$I_F = 1\text{ A}$ , $t_p = 100\text{ }\mu\text{s}$	$I_e$	340	600		mW/sr
Radiant power	$I_F = 100\text{ mA}$ , $t_p = 20\text{ ms}$	$\phi_e$		40		mW
Temperature coefficient of $\phi_e$	$I_F = 20\text{ mA}$	$TK_{\phi_e}$		-0.6		%/K
Angle of half intensity		$\varphi$		$\pm 17$		deg
Peak wavelength	$I_F = 100\text{ mA}$	$\lambda_p$		940		nm
Spectral bandwidth	$I_F = 100\text{ mA}$	$\Delta\lambda$		30		nm
Temperature coefficient of $\lambda_p$	$I_F = 100\text{ mA}$	$TK_{\lambda_p}$		0.2		nm/K
Rise time	$I_F = 100\text{ mA}$	$t_r$		15		ns
Fall time	$I_F = 100\text{ mA}$	$t_f$		15		ns

**BASIC CHARACTERISTICS** ( $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified)

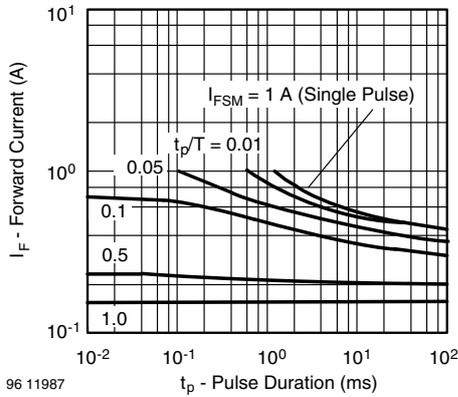


Fig. 3 - Pulse Forward Current vs. Pulse Duration

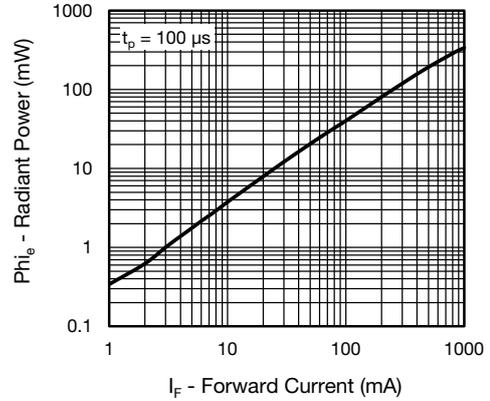


Fig. 6 - Radiant Power vs. Forward Current

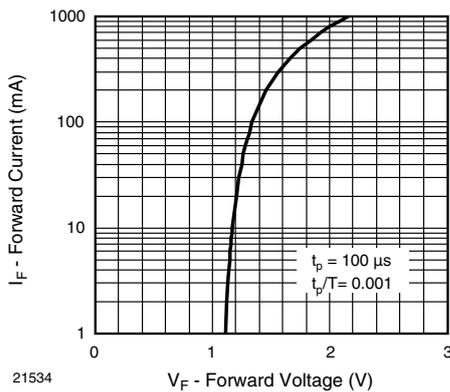


Fig. 4 - Forward Current vs. Forward Voltage

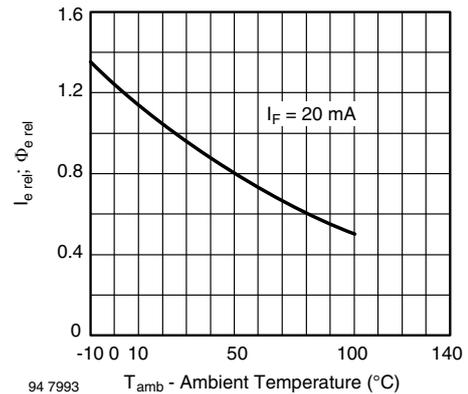


Fig. 7 - Relative Radiant Intensity/Power vs. Ambient Temperature

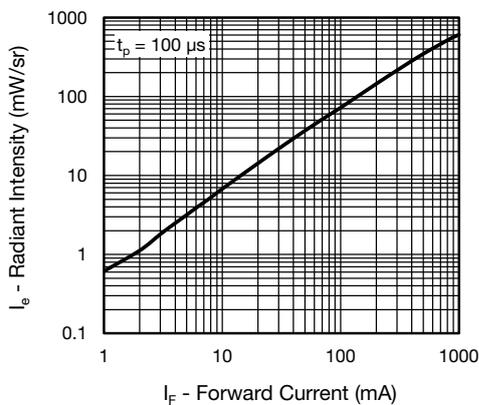


Fig. 5 - Radiant Intensity vs. Forward Current

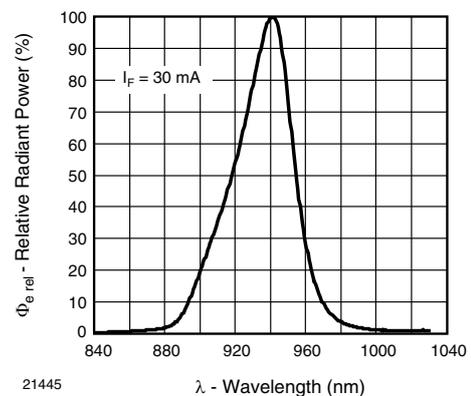


Fig. 8 - Relative Radiant Power vs. Wavelength

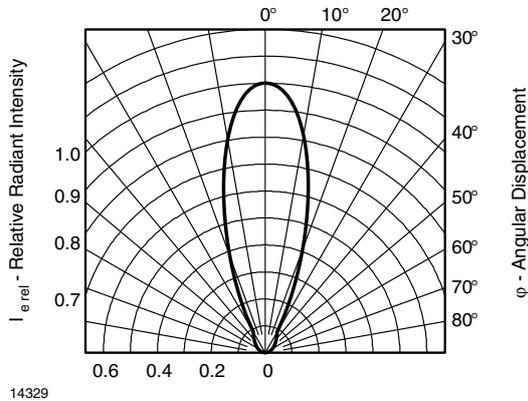
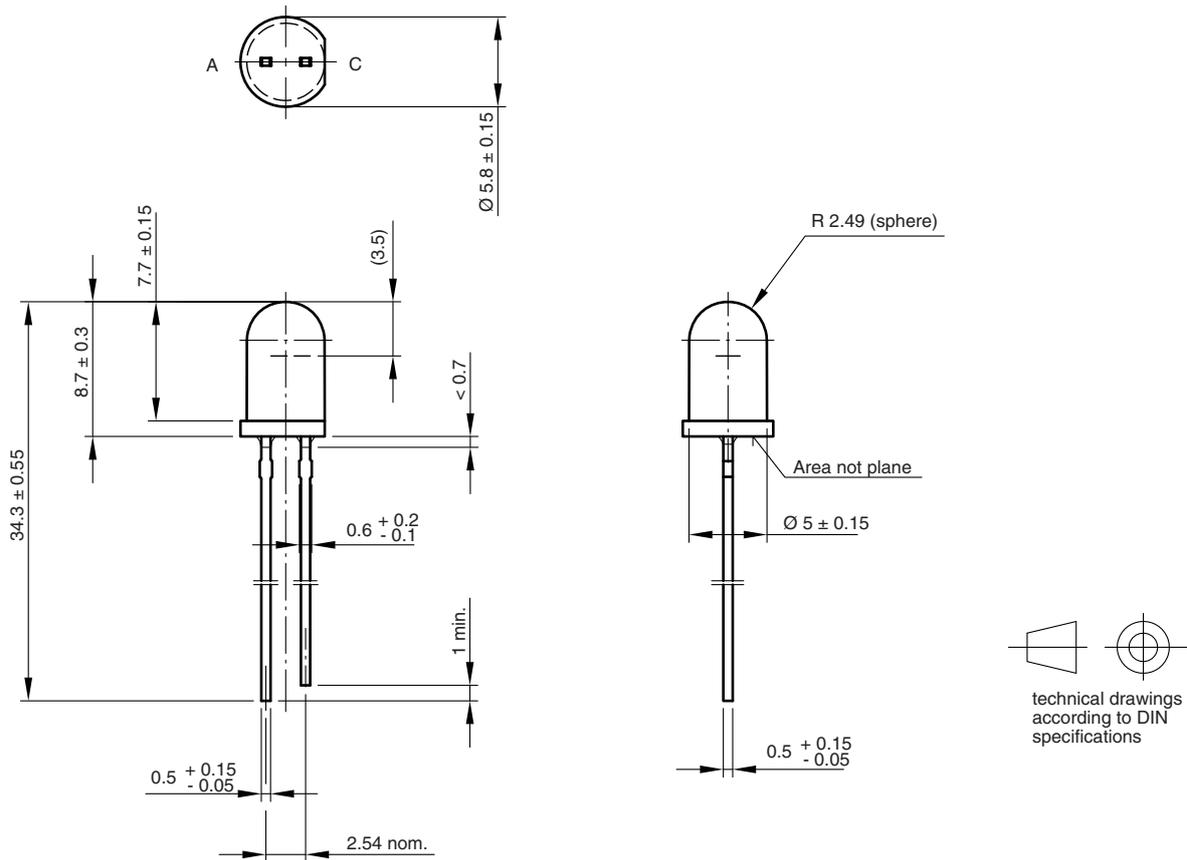


Fig. 9 - Relative Radiant Intensity vs. Angular Displacement

**PACKAGE DIMENSIONS** in millimeters



Drawing-No.: 6.544-5259.06-4  
 Issue: 6; 19.05.09  
 19257



## **Disclaimer**

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and / or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

ANEXO B – *Data Sheet* do piranômetro  
KIMO SL200

# Solarimeter SL 200



## ■ Technical features

### • SL 200 Instrument

Solar irrigation measuring range.....	from 1 W/m <sup>2</sup> to 1300 W/m <sup>2</sup>
Energetic exposure measuring range.....	from 1 Wh/m <sup>2</sup> to 500 kWh/m <sup>2</sup>
Frequency of the measure.....	2 / s
Accuracy.....	5% of measurement
Calculation frequency (W/m <sup>2</sup> ).....	1 / min (average on 60 seconds)
Storage capacity.....	31 days, 44640 saved recording points
Fast datas download.....	1000 values/second
Detection.....	out of range and sensor default
Operating temperature.....	from -10°C to +50°C
Storage temperature.....	from -10°C to +55°C
Package dimensions.....	58 x 120 x 33 mm
Autonomy.....	more than 72 hours in continuous mode Unlimited with power supply adapter
Power supply.....	3 LR3-AAA batteries
Electronic.....	Digital
Electronic card.....	Varnish
Conformity.....	in accordance with RoHS directives



### • Solar cell

Spectral response.....	from 400 to 1100 nm
Nominal sensitivity.....	100mv for 1000W/m <sup>2</sup> *
Response in cosine.....	corrected until 80°
Coefficient in temperature.....	+0,1% /°C
Effective area.....	1 cm <sup>2</sup>
Operating temperature.....	from -30°C to +60°C
Humidity dependence.....	100% RH
UV performance.....	excellent (PMMA filter)
Mode.....	photovoltaic
Material.....	polycrystallin silicon
Front face.....	translucent PMMA
Tightness.....	Polyurethane resin and housing in PMMA and polyacetol
Cell weight.....	60g
Cell dimensions.....	30 x 32 mm
Cable length.....	1,25 m (can be unplugged)

\* SL200 is supplied with a calibration certificate in reference to the WRR (World Radiometric Reference).

\*\* Timed : duration of dataset is expressed in DD/HH/MM/SS



The portable autonomous solarimeter measures the solar irrigation for the control of photovoltaic and thermal installations on test or on site:

- **Measurement and spot check of the solar irrigation in W/m<sup>2</sup>**  
(instantaneous, average, time-recording, min/max values, hold function)
- **Calculation of the energetic exposure in Wh/m<sup>2</sup>**  
during the timed measures campaign\*
- **Storage and saving of average values**  
of power and updating the energetic exposure calculation every minutes
- **Recorded datas can be read on the display, and the graphic function allows a fast interpretation of the measure file**

## ■ SL 200

- Easy to use, for immediate informations
- Evaluation of the produced electric powers, optimum orientation of solar panels and performances follow-up.
- Analysis of sunshine on site, on short and long-term period.
- Choice and determination of the thermal or photovoltaic generators features
- Storage and saving of average values of power; update of energetic exposure calculation every minute
- Easy use of datas stored in memory,
- Reading and graphical approximation of datas by 24 hours via transfer data software.

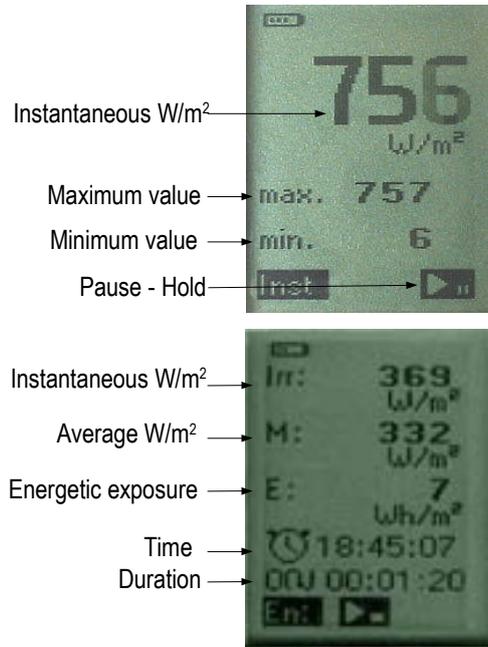


For the QualiSOL,  
QualiPV certified  
professionals,  
the office control for  
the Guarantee of  
Solar Result

## Presentation



## 1. Measurement



- ① ② ③ Functions keys
- ④ Delete and Back screen key
- ⑤ Screen key
- ⑥ On/Off key

## 2. Reading



Global values



Time-recorded stored values



Scrolling of the successive graphs 00H-24H

## 3. Transfer



### Supplied with ...

- Transport case with protective foam
- Mini-USB connection cable
- 3 LR3-AAA batteries
- CD-ROM with the Instructions for use, setup software for USB driver, datas transfer software.
- Calibration certificate

### Optional

- Tripod
- Fixing kit for solar panels  
Extensions : 5m, 10m and on demand
- Power supply adapter



[www.kimo.fr](http://www.kimo.fr)

EXPORT DEPARTMENT

Tel : + 33. 1. 60. 06. 69. 25 - Fax : + 33. 1. 60. 06. 69. 29

e-mail : [export@kimo.fr](mailto:export@kimo.fr)



Distributed by :